

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

GÉNIE ÉNERGÉTIQUE

Énergie solaire

Calculs et optimisation

Jacques BERNARD



TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

ادعوا بالخير لالاخ عبر الناصر

الذي قام بنسخ الكتاب ...

GÉNIE ÉNERGÉTIQUE

Énergie solaire

Calculs et optimisation

Jacques BERNARD

Professeur agrégé

INSA de Toulouse



dans la même collection

- Transferts thermiques, application à l'habitat. Méthode nodale 224 p. (C) H. CORTES, J. BLOT
- Actions mécaniques, Statique, Inertie. De la théorie aux applications 224 p. (A) Cl. CHÈZE, F. BRONSARD
- Mécanique des milieux déformables 288 p. (B) M. FOURAR, Cl. CHÈZE
- Machines à fluides. Principes et fonctionnement 288 p. (C) M. PLUVIOSE
- Ingénierie des turbomachines. Cours et exercices résolus 288 p. (C) M. PLUVIOSE
- Dimensionnement des structures. Résistance des matériaux 224 p. (B) Cl. CHÈZE
- Vibrations des structures 224 p. (B) G. VENIZELOS
- Transmissions mécaniques de puissance. Boîtes de vitesses automatiques 288 p. (C) Ph. ARQUES
- Moteurs alternatifs à combustion interne. De la théorie à la compétition 288 p. (C) Ph. ARQUES
- Conception et construction des moteurs alternatifs 288 p. (C) Ph. ARQUES
- Réactions thermiques en phase gazeuse. Modélisation 288 p. (C) G.-M. CÔME
- Les traitements de l'eau. Cours et problèmes résolus 256 p. (B) Cl. CARDOT
- Techniques appliquées au traitement de l'eau 256 p. (B) (coord.) Cl. CARDOT

ISBN 2-7298-1897-9

© Ellipses Édition Marketing S.A., 2004
32, rue Bargue 75740 Paris cedex 15



Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5.2° et 3°a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (Art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.editions-ellipses.fr

TABLE DES MATIÈRES

AVANT PROPOS	7
NOTATIONS	12
CHAPITRE I. L'ÉNERGIE SOLAIRE HORS ATMOSPHÈRE	
1. Le système solaire	15
2. Le Soleil	19
3. L'énergie solaire	23
3.1. Origine	23
3.2. La constante solaire	24
3.3. Vie et mort du Soleil	25
3.4. Spectre solaire	27
CHAPITRE II. LE COUPLE TERRE-SOLEIL	
1. L'atmosphère terrestre	33
1.1. Structure	33
1.2. Composition de la troposphère	37
2. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire	39
2.1. Masse atmosphérique	39
2.2. Atténuation du rayonnement solaire	40
2.3. La lumière solaire	42
3. Les échanges d'énergie	45
3.1. Notion d'albédo	45
3.2. Bilan énergétique annuel global du système Terre-atmosphère	46
3.3. Échanges d'énergie entre la Terre et l'Atmosphère	49
CHAPITRE III. RÉCEPTION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE	
1. Calcul de la position du soleil	53
1.1. Paramètres de position	53
1.2. Paramètres de temps	60
1.3. Cas particuliers	62
1.4. La gnomonique	64
2. Diagramme solaire	66
3. Éclairement solaire	77
3.1. Éclairement direct	77
3.2. Éclairement diffus	78
3.3. Éclairement global	79
3.4. Rapports d'éclairement	79
4. Irradiation solaire	81
4.1. Irradiation hors atmosphère	81
4.2. Cas d'un ciel clair	82
4.3. Cas d'un ciel variable	83
4.4. Instruments de mesure	86
4.5. Résultats des mesures	87
4.6. Méthodes de calcul de l'irradiation	90
CHAPITRE IV. LES CAPTEURS PLANS	
1. Éléments de construction	95
1.1. Surface absorbante	95
1.2. Fluide caloporteur	98
1.3. Couverture transparente	99

1.4. Isolant	104
2. Rendement d'un capteur plan	107
2.1. Bilan énergétique	107
2.2. Influence de la température de l'absorbeur	107
2.3. Influence de la température d'entrée du fluide caloporteur	113
3. Régime transitoire	120
3.1. Position du problème	120
3.2. Étude simplifiée	120
 CHAPITRE V. APPLICATIONS À BASSE TEMPÉRATURE	
1. Généralités	123
2. Eau chaude sanitaire	125
2.1. Système direct	125
2.2. Système à circulation forcée	126
3. Chauffage des locaux	132
3.1. Description des systèmes	132
3.2. Stockage par ballon d'eau	132
3.3. Stockage par lit de pierres	137
3.4. Stockage par mur capteur	141
4. Détermination des besoins en chauffage	143
4.1. Coefficient GV	143
4.2. Coefficient BV	145
4.3. Méthode des degrés-jours	145
4.4. Réglementation thermique 2000	147
5. Maison bioclimatique	149
5.1. Les techniques passives	149
5.2. Les techniques dynamiques	151
6. Piscine solaire	153
6.1. Principe	153
6.2. Analyse énergétique	153
7. Séchage solaire	159
8. Climatisation solaire	161
9. Distillation solaire	166
10. Analyse économique	167
10.1. Paramètres	167
10.2. Intérêts des emprunts	167
10.3. Équations	168
10.4. Optimisation d'une installation solaire	169
 CHAPITRE VI. LES CAPTEURS À CONCENTRATION	
1. Description	171
1.1. Définitions	171
1.2. Détermination de la concentration géométrique	173
1.3. Concentration géométrique maximale	176
1.4. Température maximale du récepteur	178
2. Concentrateur sphérique	180
2.1. Concentration idéale	180
2.2. Concentration géométrique	180
2.3. Concentration énergétique	180
3. Concentrateur parabolique	182
3.1. Concentration idéale	182
3.2. Concentration géométrique	183
3.3. Concentration énergétique	184
4. Concentrateur cylindro-parabolique	186
4.1. Concentration idéale	186
4.2. Concentration géométrique	187
4.3. Concentration énergétique	187
4.4. Montage	187

5. Les centrales solaires	189
5.1. Le rendement de conversion	189
5.2. Réalisations	191
CHAPITRE VII. LES PHOTOPILES	
1. L'effet photovoltaïque	193
1.1. Introduction	193
1.2. Principe	194
1.3. Rendement de la photopile idéale	197
1.4. Rendement réel	198
1.5. Influence de la résistance de charge	202
1.6. Influence de l'éclairement	204
1.7. Influence de la température	205
1.8. Les améliorations possibles	205
2. Utilisations	207
2.1. Montage série	207
2.2. Montage parallèle	207
2.3. Mise en œuvre	208
2.4. Avantages et inconvénients	209
2.5. Réalisations	210
ANNEXES	
A. Caractéristiques de l'air	214
B. Caractéristiques de l'eau	215
C. Table de la vapeur d'eau saturée	216
D. Éléments d'échanges thermiques	217
E. Détermination des pertes de charge hydrauliques	225
F. Constantes physiques	230
G. Les unités en énergétique	231
H. Chiffres clés sur l'énergie solaire	232
I. Organismes, sociétés et associations s'intéressant à l'énergie solaire	236
J. Sigles et abréviations	239
K. Petit dictionnaire anglais-français	240
SOURCES	243
GLOSSAIRE	245
INDEX	250

LISTE DES APPLICATIONS

I.1	Détermination de la masse du Soleil	22
I.2	Énergie libérée par la fusion de quatre atomes d'hydrogène	24
I.3	Puissance rayonnée par le Soleil	25
I.4	Température de la photosphère	25
I.5	Masse perdue par le Soleil chaque seconde	25
I.6	Espérance de vie sur Terre	26
I.7	Répartition de la puissance solaire par bandes spectrales	29
I.8	Étude d'un satellite	30
II.1	Masse de l'atmosphère	38
II.2	Comparaison des masses atmosphériques théorique et réelle	40
II.3	Absorption du rayonnement solaire par l'humidité de l'atmosphère	40
II.4	Puissance solaire reçue par un capteur plan	43
II.5	Efficacité lumineuse relative de la lumière solaire	44
II.6	Énergie solaire reçue par le système Terre-Atmosphère	45

II.7	Fenêtre de transparence de l'Atmosphère	48
II.8	Température moyenne de notre planète	49
II.9	Température moyenne du sol terrestre	49
II.10	Nouvel équilibre de la température du système Terre-atmosphère	52
III.1	Numéro du jour	55
III.2	Coordonnées locales du soleil	60
III.3	Temps solaire vrai	62
III.4	Lever et coucher du soleil	63
III.5	Cadran solaire	64
III.6	Effet de masque	75
III.7	Distance minimale entre capteurs	77
III.8	Rapports d'éclairement	80
III.9	Irradiation journalière sur un plan horizontal	82
III.10	Irradiation annuelle sur un plan horizontal	84
III.11	Irradiation journalière sur un plan incliné	86
III.12	Irradiations journalières expérimentales	89
III.13	Méthode de calcul de l'irradiation journalière par ciel clair	90
III.14	Irradiation mensuelle	92
III.15	Irradiation annuelle	92
IV.1	Équilibre thermique de surfaces sélectives à la limite de l'atmosphère	97
IV.2	Facteur de transmission d'un vitrage	101
IV.3	Effet de serre	103
IV.4	Pertes thermiques à travers l'isolant d'un capteur	105
IV.5	Rendement instantané d'un capteur plan	111
IV.6	Rendement moyen d'un capteur plan sur une journée	118
IV.7	Évolution de la température de plaque en régime transitoire	121
V.1	Évolution de la température de l'eau d'un ballon de stockage solaire	124
V.2	Taux de couverture solaire d'un système de production d'ECS	127
V.3	TCS d'un système de chauffage d'une habitation	133
V.4	Stockage thermique par lit de pierres	139
V.5	Mur capteur	142
V.6	Énergie de chauffage d'une habitation	147
V.7	Énergie perdue par ventilation	152
V.8	Piscine solaire	156
V.9	Séchage solaire	160
V.10	Climatisation solaire	164
V.11	Optimisation économique d'une batterie de capteurs	170
VI.1	Concentration d'un miroir sphérique	181
VI.2	Four solaire d'Odeillo	184
VI.3	Capteur cylindro-parabolique	188
VI.4	Rendement de conversion de capteurs solaires	191
VII.1	Longueur d'onde de coupure d'une photopile	196
VII.2	Rendement maximum d'une photopile	202
VII.3	Influence de la résistance de charge	203
VII.4	Influence de l'éclairement	204
VII.5	Influence de la température de fonctionnement	205
VII.6	Puissance thermique à évacuer	208
VII.7	Entraînement d'une pompe à eau	211
VII.8	Alimentation électrique d'un refuge de montagne	211



AVANT PROPOS

*Sol omnibus lucet*¹

Le Soleil est à l'origine de la Vie sur Terre et la perpétue par son apport incessant d'énergie. Cette énergie nous arrive sous forme d'un rayonnement électromagnétique après avoir parcouru des millions de kilomètres. Notre Étoile, véritable boule de feu, nous envoie à travers l'espace, une énergie considérable qui nous éclaire, nous réchauffe, fait croître les plantes...

Depuis les temps les plus reculés l'homme a perçu l'importance du soleil et l'a affublé de pouvoirs divins. Devenu *Oeil du ciel* chez certaines peuplades d'Australie, adoré chez les Incas et les Égyptiens (dieu Ré ou Râ), appelé le nourrisseur dans les textes hindous, représenté sur le dix-neuvième arcane majeur du Tarot, symbolisant la puissance royale sous Louis XIV, emblème du Japon... l'Hélios des grecs est universel.

Il apparaît le plus souvent comme le symbole de l'immortalité, disparaissant le soir pour mieux renaître le matin.



Bas relief représentant Hathor, mère de Ré, avec, sur la tête, le disque solaire entre deux cornes (île de Philae – Haute Égypte)

*Magnifique est ton apparition à l'horizon du ciel, ô
Disque vivant qui vécut le premier !
Bien que tu sois éloigné, tes rayons sont sur terre.
Tu es seul et des millions d'êtres vivent grâce à Toi.
Ils reçoivent de Toi le souffle de vie.
C'est toi Aton.
Tu vis éternellement.*

Hymne à Aton (tombe du pharaon Aï, vers 1320 avant J.-C.)

Cette importance du soleil dans la vie sur terre est complexe. Il réchauffe les corps et les cœurs. Les médecins qui l'ont bien compris ont développé l'héliothérapie, ou l'art de soigner les maux du corps et de l'esprit par le rayonnement solaire. Mais le soleil n'en reste pas moins dangereux. Le *coup de soleil* en est une illustration douloureuse et la nocivité de certains UV n'est plus à démontrer. Absolue nécessité mais danger potentiel, le soleil fait preuve d'ambivalence.

¹ Le Soleil brille pour tout le monde.

On retrouve cette ambivalence dans l'attitude de l'homme moderne face au défi de l'approvisionnement énergétique du monde. Certains, prêchant le *tout solaire*, partent en croisade en avançant des arguments pseudo scientifiques qui font grand tort à la cause qu'ils sont sensés défendre. Il n'y a pas de *bonne* ou de *mauvaise* énergie. L'homme a besoin d'énergie pour vivre et prospérer. Toute source a sa place et s'il est absurde de jurer par le *tout nucléaire* ou le *tout éolien*, il est aussi absurde de vouloir instaurer le *tout solaire*. Bien que le Soleil nous envoie une énergie énorme, 15 000 fois supérieure à la consommation mondiale, il n'est pas possible de se contenter directement de cette seule source énergétique car les contraintes qui grèvent les bilans et pèsent sur les rendements sont nombreuses.

Il n'en reste pas moins vrai que l'énergie solaire a sa place dans la palette des énergies utilisables par l'Homme. Mais tout projet de son exploitation doit être mené avec une rigueur scientifique et économique, détachée de toute idéologie. Le développement de l'énergie solaire a tout à y gagner et le citoyen aussi. Dans le cas contraire, cette source d'énergie risque de se voir cantonnée à quelques réalisations démonstratives, objets de la condescendance des pouvoirs publics et des décideurs. Et le citoyen lambda qui aura embrassé la cause du *tout solaire* sera le premier à brûler ce qu'il aura adoré, pensant avoir été floué, dès qu'il aura froid ou verra la lumière de sa lampe vaciller...

Pour la production d'énergie, le soleil est une source d'énergie parmi d'autres, bien que la plupart des autres sources d'énergie soient d'origine solaire.

Les hydrocarbures sont en fait de l'énergie solaire mise *en boîte* par le phénomène de la photosynthèse. De la matière organique, en particulier végétale, donc produite par photosynthèse, s'est trouvée au fil des siècles, enfouie sous des sédiments où elle a perdu tout ou partie de son oxygène. Là elle s'est transformée lentement en pétrole ou en gaz naturel. Quant au charbon il est, lui aussi, d'origine végétale; sa naissance est donc directement due à l'action des rayons solaires. Malheureusement cette boîte, remplie d'hydrocarbures, se vide plus vite qu'elle ne se remplit...

Quant à la biomasse, directement issue de la photosynthèse, elle correspond aux prémisses de la longue transformation de la matière organique en pétrole.

L'énergie hydraulique provient du cycle évaporation-condensation créé par la chaleur solaire. L'eau de pluie est recueillie dans des bassins d'où, par gravité, elle alimente des turbines hydrauliques.

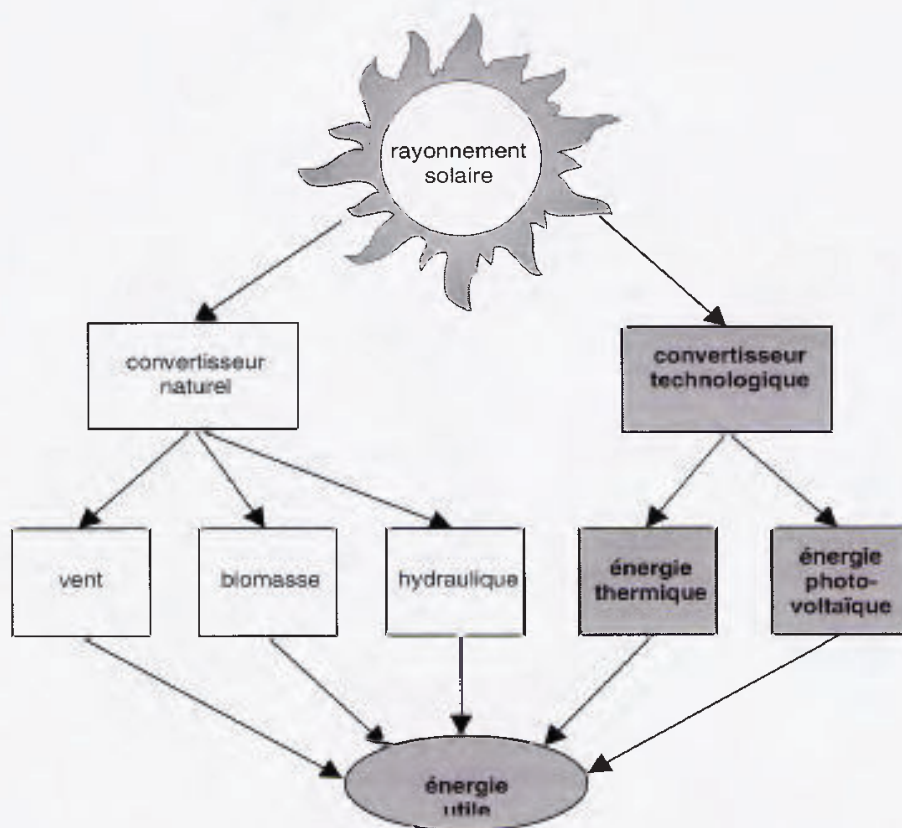
Le rayonnement solaire étant réparti inégalement à la surface du globe, il se produit de grands mouvements des masses fluides que sont les océans et l'atmosphère. Ces déplacements de matière tendent à homogénéiser le champ des pressions et celui des températures. L'homme essaye d'exploiter ces énergies mécaniques d'origine solaire. La plus prometteuse est assurément l'énergie éolienne produite par le mouvement de l'air atmosphérique.

L'énergie marémotrice, quant à elle, est principalement due à la lune mais aussi au soleil pour 1/3 environ.

La géothermie utilise le gradient de température que l'on constate dans l'écorce terrestre. Quant à l'énergie nucléaire elle utilise le potentiel énergétique de la fission de l'uranium que l'on trouve dans cette même écorce terrestre. C'est deux dernières sources d'énergie ne relèvent donc pas directement du Soleil.

Quand on parle d'énergie solaire, on entend habituellement par là l'utilisation directe du rayonnement provenant de l'astre du jour à l'exclusion de toutes les autres énergies dont on vient de parler. C'est d'ailleurs l'objet de cet ouvrage qui se limite à l'utilisation directe de l'énergie solaire.

Étudier une source d'énergie nécessite de définir trois critères : sa densité, sa régularité et sa conversion. Qu'en est-il de l'énergie solaire ?



Sachant que la puissance reçue au niveau du sol ne peut guère dépasser 1000 watts par m^2 , il apparaît tout de suite que c'est une énergie peu dense; on parle alors d'*énergie diffuse*. Dans ces conditions, il est difficile d'obtenir une puissance importante. Prenons le cas d'une automobile d'une puissance moyenne de 60 kW, il faudrait une surface de captation de 60 m^2 pour fournir cette puissance².

Pour obtenir de fortes puissances, la surface de captation au niveau du sol devient vite très importante, ce qui pose des problèmes de disponibilité et donc de coût dans les zones urbanisées.

À ce côté diffus s'ajoute un problème de régularité. L'énergie solaire est cyclique. À court terme on rencontre le cycle jour-nuit et à moyen terme le cycle des saisons qui peut être plus ou moins marqué suivant les latitudes. De plus l'ensoleillement d'un lieu est aléatoire; il est soumis aux caprices du temps. L'utilisation de l'énergie solaire est donc conditionnée à la mise en place d'un système de stockage, inhérent au problème de non régularité d'une énergie. Sous nos latitudes, se chauffer à l'énergie solaire nécessite de prévoir un certain volume de matériau (eau, galets) qui stockera l'énergie de la journée pour la restituer la nuit. Par contre, étant abondante l'été; l'énergie solaire est toute désignée pour chauffer l'eau de nos piscines ou bien faire fonctionner un groupe de climatisation à absorption.

La plupart du temps l'énergie provenant d'une source donnée ne peut être utilisée telle quelle. Il faut la transformer. C'est le rôle du convertisseur. Celui-ci peut être très complexe comme dans le cas d'une centrale nucléaire qui transforme l'énergie potentielle atomique de l'uranium en électricité. Dans le cas du soleil, si l'on ne cherche qu'à obtenir de la chaleur, la conversion du rayonnement (énergie électromagnétique) en énergie utile (thermique) est très

² Et encore faudrait-il que les capteurs soient en permanence orientés vers le soleil et transforment l'énergie reçue en travail avec un rendement de 100 %.

facile. Le convertisseur peut être une simple surface de couleur sombre ou bien la peau d'un vacancier bronzant sur la plage. On ne peut trouver plus économique comme convertisseur ! La concordance de forme est dans ce cas très bonne. Par contre si l'on cherche à produire du travail, il est nécessaire d'élever la température de fonctionnement³ et d'utiliser un convertisseur complexe (centrale électrosolaire par exemple). Cette mauvaise concordance de forme entraîne un rendement de conversion relativement bas.



Ces trois critères nous amènent à considérer certaines situations qui se prêtent plus particulièrement à l'utilisation économique de l'énergie solaire. C'est le cas lorsque les trois conditions suivantes sont vérifiées :

1. La région est ensoleillée : il faut qu'il y ait bien sûr du soleil; c'est le cas par exemple des régions tropicales et désertiques; il y a alors une bonne concordance de lieu.
2. La demande énergétique est faible : en général on trouve cette situation quand la population est dispersée et que le développement industriel est faible. C'est le cas par exemple de régions reculées ou insulaires pour lesquelles le soleil est la seule source durable d'énergie.
3. Il n'existe aucun réseau de distribution d'énergie : la plupart du temps lorsque le point 2 est vérifié, il en est de même du point 3. Les zones faiblement urbanisées sont rarement dotées d'un réseau de distribution continue de l'énergie.

Lorsque ces trois conditions sont réunies, le rôle de l'énergie solaire peut devenir prépondérant. C'est le cas de nombreux pays en voie de développement (PVD), très ensoleillés, avec un habitat dispersé et une population peu consommatrice d'énergie; la plupart du temps aucun réseau d'électrification n'a été implanté; le recours à l'énergie solaire, à partir de modules photovoltaïques, pour faire marcher des pompes ou des réfrigérateurs s'avère extrêmement intéressant.

Mais l'utilisation de l'énergie solaire ne se limite pas aux PVD car les technologies à inventer ou à développer pour l'utiliser de façon rentable sont du ressort des pays industrialisés. De plus, même sous nos latitudes, l'utilisation du solaire, pour le chauffage d'habitations, d'eau chaude sanitaire ou de piscines, a fait ses preuves. D'autre part, certaines technologies de pointe, comme le spatial, nécessitent une bonne connaissance du soleil et de l'énergie qu'il rayonne, soit pour s'en protéger (thermique des satellites), soit pour l'utiliser comme source d'énergie (panneaux de photopiles). La station spatiale internationale (ISS⁴) par exemple sera dotée de 890 m² de panneaux photovoltaïques devant fournir une puissance de 110 kW.

L'énergie solaire est-elle rentable ? À cette question, il faut répondre : "cela dépend". Si le rayonnement solaire est *gratuit*, il n'en est pas de même de la technologie à mettre en œuvre pour le capter et le transformer en énergie utile. Dans le cas des satellites la rentabilité est assurée par la haute valeur ajoutée de ce type de matériel. Pour l'habitat, il faut tenir compte de tous les paramètres : coûts des autres énergies, niveau d'ensoleillement, mode de vie, avantages fiscaux, ...

³ Le rendement de l'installation est plafonné par celui de Carnot η_c directement lié à la température chaude T_c du cycle étudié : $\eta_c = 1 - \frac{T_f}{T_c}$ où T_f est la température de la source froide (le plus souvent air atmosphérique ou eau d'une rivière).

⁴ International Space Station

L'ingénieur énergétique se doit de trouver la réponse la plus favorable à un problème posé. Mais cette réponse n'est pas immédiate et ce qui peut être vrai aujourd'hui ne le sera plus demain. L'engouement pour le *tout solaire* de la fin des années 70 suivi d'un désintéressement tout aussi subit quelques années plus tard puis le renouveau actuel, tout cela montre, s'il en était besoin, la place de l'immédiateté dans la gestion des sociétés.

There is a tide in the affairs of men⁵

Il est absolument nécessaire d'envisager l'utilisation de l'énergie solaire dans la continuité et non dans des accès de fièvre cycliques, dommageables pour sa viabilité économique. La Communauté Européenne poussant à la consommation d'énergie renouvelable, gageons que l'énergie solaire trouve une place durable dans le catalogue des énergies offertes à l'homme par la nature.

Les pages qui suivent présentent la partie scientifique qu'il est nécessaire de connaître pour procéder objectivement à un choix technologique.

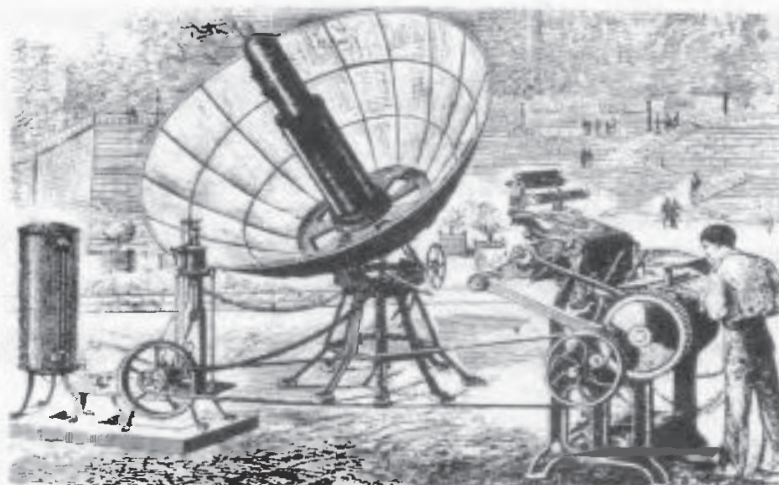
On y trouvera tout d'abord (chapitres I à III) les bases indispensables pour mener à bien les calculs de détermination du gisement solaire d'un site donné.

Dans les chapitres IV et V seront traitées les applications à basse température qui sont les plus courantes et les plus rentables économiquement.

Le chapitre VI fournira quelques précisions sur le problème de la concentration solaire nécessaire pour atteindre les hautes températures.

Enfin nous terminerons cette ouverture sur le solaire par une présentation de la technologie photovoltaïque dont le développement actuel est plus que prometteur (chapitre VII).

J.B.



Machine à vapeur solaire entraînant une rotative d'imprimerie (Professeur Mouchot – 1878)

Remerciements :

Je tiens à remercier mes étudiants pour leurs remarques pertinentes et particulièrement ceux de la promotion 2003 de l'orientation Énergétique du département de Génie Mécanique de l'INSA de Toulouse.

⁵ Il y a une marée dans les affaires des Hommes (Shakespeare – Julius Caesar IV.3).

NOTATIONS

alphabet latin

a	azimut ($^{\circ}$), diffusivité (m^2/s)
a*	albédo solaire
B	coefficient de déperdition volumique ($\text{W}/\text{m}^3.\text{K}$)
b	épaisseur de la lame d'air d'un capteur plan (m)
C	coût (€), concentration géométrique
c	vitesse (m/s), vitesse de la lumière
C*	constante solaire (W/m^2), concentration énergétique
c_p	chaleur massique à pression constante ($\text{J}/\text{kg}.\text{K}$)
d	distance (m)
D	diamètre (m)
D*	éclairement solaire diffus (W/m^2)
E	éclat (d'une étoile), émittance énergétique (W/m^2), énergie (J)
e	facteur d'irradiation, épaisseur
E_g	bande interdite (eV)
f	distance focale (m)
F	facteur de forme, rendement d'irrigation, facteur de four
F_t	facteur de transfert thermique
g	accélération de la pesanteur (m/s^2)
G	coefficient de déperdition volumique ($\text{W}/\text{m}^3.\text{K}$), constante de gravitation
G*	éclairement solaire global (W/m^2)
h	hauteur ($^{\circ}$), facteur d'échange thermique par convection ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$), constante de Planck
I	intensité (A)
i	inclinaison par rapport à l'horizontale ($^{\circ}$), taux d'intérêt
I*	éclairement solaire (W/m^2)
j	perte de charge (m)
jj	numéro du jour dans le mois
K	conductance thermique ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$)
k	constante de Boltzmann, coefficient de dilatation (k_d) ou d'extinction (k_e)
l	longueur (m)
L	longitude ($^{\circ}$)
M	magnitude absolue
m	magnitude relative, masse atmosphérique, masse (kg)
m*	masse atmosphérique théorique
mm	numéro du mois de l'année
n	numéro du jour de l'année, indice de réfraction d'un milieu transparent
N	nombre de couvertures transparentes
P	puissance (W)
p	pression (Pa)
Q	énergie thermique (J)
q	charge de l'électron
\dot{Q}	puissance thermique (W)
R	rapport d'éclairement, résistance thermique ($\text{K}/[\text{W}/\text{m}^2]$), rayon (m)
S	surface (m^2)
S*	éclairement solaire direct (W/m^2)
T	température (K, $^{\circ}\text{C}$)

t	temps (s)
V	tension (V), volume (m ³), vitesse (m/s)
w	vitesse du vent (m/s)
z	altitude (m)

alphabet grec

α	facteur d'absorption ou absorptivité, ascension droite (°)
β	efficacité relative
γ	orientation azimutale d'un capteur (°), point vernal
δ	déclinaison (°)
ε	facteur d'émission ou émissivité
η	rendement
θ	angle (°)
λ	conductivité thermique (W/m.K), coefficient de perte de charge régulière
μ	viscosité dynamique (Pa)
ν	viscosité cinématique (m ² /s)
ν^*	rendement optique d'un capteur plan
ξ	coefficient de perte de charge singulière
ρ	facteur de réflexion ou réflectivité, masse volumique (kg/m ³)
σ	facteur d'éclairement ou constante de Stefan-Boltzmann
τ	facteur de transmission
φ	latitude (°)
χ	périmètre mouillé (m)
ω	angle horaire (°)

indice inférieur caractérise une grandeur relative à :

a	environnement, annuel, appoint, air
ar	arrière
atm	atmosphère
av	avant
b	corps noir
c	couverture transparente, convection, capteur, coupure
ch	chaudière
cv	convection
D	rayonnement diffus
e	eau, appoint
ecs	eau chaude sanitaire
eq	équipements
ev	évaporation
f	fluide
G	rayonnement global, Gauss
h	plan horizontal
i	isolant, intérieur
m	midi solaire, maison, mensuel
max	maximale
o	ciel clair, ouverture, eau du réseau
opt	optimisée
p	plaque absorbante
r	réflexion, rayonnement

S	rayonnement direct
s	stockage, solaire
u	utile
∞	ciel, espace
*	solaire
0	lever ou coucher, hors atmosphère
λ	longueur d'onde

indice supérieur caractérise une grandeur relative à :

- * éclairement (W/m^2), bande spectrale d'émission du soleil

ABRÉVIATIONS

AL	Année Lumière
AM	Air Mass (masse atmosphérique)
CAR	Clapet Anti Retour
CN	Corps Noir
CS	Coucher du Soleil
ddi	durée d'insolation
ddj	durée du jour
ET	Équation du Temps
IR	Infrarouge
LS	Lever du Soleil
mCE	mètre de Colonne d'Eau
pc	parsec
PSD	Plancher Solaire Direct
PV	PhotoVoltaïque
TL	Temps Légal
TSM	Temps Solaire Moyen
TSV	Temps Solaire Vrai
TU	Temps Universel
UA	Unité Astronomique
ECS	Eau Chaude Sanitaire
EF	Eau Froide
TCS	Taux de Couverture Solaire
UV	Ultraviolet
ndj	nombre de degrés-jours



CHAPITRE I

L'ÉNERGIE SOLAIRE HORS ATMOSPHÈRE

1. LE SYSTÈME SOLAIRE

De tous temps l'Homme a tourné son regard vers les étoiles cherchant à comprendre son environnement et s'interrogeant face à l'infini.

Il faut bien reconnaître que les savants qui scrutaient les cieux étaient autant astrologues qu'astronomes. Ils tentaient d'expliquer le mouvement des corps célestes pour émettre des prévisions. Ils sondaient l'espace pour déchiffrer le futur...

Mais au fil du temps l'astronomie a pris ses distances vis à vis de l'astrologie. De nos jours elle se cantonne à la recherche scientifique et n'a plus rien à voir avec un art divinatoire.

La dimension visuelle des corps célestes a longtemps limité l'étude des astres au Soleil pour la partie diurne de la journée et à la Lune pour la partie nocturne, d'où leur importance sociale. Néanmoins les Mésopotamiens ont dressé des tables d'observation de certaines étoiles formant les constellations.

La première représentation « moderne » du système solaire nous est donnée par Philolaos, disciple du savant grec Pythagore (V^e siècle av. J.-C.). Pour lui toutes les planètes y compris la Terre sont des corps sphériques en rotation autour du Soleil.

Cette hypothèse est combattue par Platon (427-347 av. J.-C.) qui place la Terre au centre de l'Univers (géocentrisme). Cette idée, reprise par Ptolémée au II^e siècle dans son *Almageste* va perdurer longtemps.

Compte tenu des techniques rudimentaires de l'Antiquité, la position relative des astres est très mal appréciée. Ainsi Hipparque, grand astronome du II^e siècle av. J.-C., considère l'ordre suivant à partir de la Terre : la Lune, le Soleil, Vénus, Mercure, Mars, Jupiter et Saturne.

L'astronomie moderne naît avec le savant polonais Nicolas Copernic (1473-1543) qui publie à la fin de sa vie un traité, *De revolutionibus orbium cœlestium libri VI*, dans lequel il défend la thèse héliocentrique : les planètes, dont la Terre, tournent autour du Soleil. Mais comme il considère des orbites circulaires, son système ne rend qu'imparfaitement compte de la réalité. En 1616 son ouvrage est mis à l'Index par l'Église qui considère alors comme sacrilège de penser que la Terre n'est pas le centre du Monde.

Le savant italien Galileo Galilei (dit Galilée 1564-1642), adepte de Copernic, fera les frais de l'obscurantisme religieux et échappera de justesse à la condamnation suprême. Grâce à la lunette astronomique, nouvellement inventée, il visualise la rotation propre du Soleil en observant le mouvement apparent de taches à sa surface.

Son confrère Giordano Bruno (1548-1600), aura moins de chance et sera brûlé vif par l'Inquisition pour avoir défendu les thèses coperniciennes. Il faut dire que cet humaniste était très en avance sur son temps puisqu'il envisageait un univers infini constitué

d'étoiles semblables au soleil autour desquelles gravitent des planètes pouvant être habitées.

Les grandes avancées dans le domaine de la représentation et de la compréhension du système solaire se font avec la théorie de la gravitation universelle de Newton (1643-1727). Celle-ci permet de comprendre les fameuses lois de Kepler (1571-1630) régissant la cinématique des planètes mais aussi de séparer science et croyances.

Peu à peu le système solaire, tel qu'on le connaît aujourd'hui, prend forme. En 1781 un astronome amateur, William Herschel (1738-1822), découvre Uranus.

Neptune, quant à elle, est *imaginée* par le calcul en 1846, à la fois et indépendamment, par l'anglais Adams et le français Le Verrier. Sa découverte, la même année, par l'allemand Galle consacra la puissance de la Mécanique céleste.

Il faut attendre 1930 pour que la neuvième planète du système solaire, appelée Pluton, soit découverte par Clyde Tombaugh à l'observatoire Lowell.

L'Univers est composé de galaxies regroupées en amas. L'un de ces amas galactiques, appelé l'amas local contient la Galaxie (avec un grand G) ou Voie Lactée ; c'est celle où nous vivons. De type spiral, elle est composée d'une centaine de milliard d'étoiles dont l'une d'entre elles est le Soleil.

Les distances séparant les objets célestes étant considérables, les unités employées ne sont plus le mètre ou le kilomètre. On utilise :

- l'*unité astronomique* UA qui correspond à la distance Terre-Soleil.

$$1 \text{ UA} = 149\,597\,870 \text{ km}$$

- l'*année lumière* AL qui est la distance parcourue par la lumière durant une année :

$$1 \text{ AL} = 63\,240 \text{ UA}$$

- le *parsec* pc égal à la distance d'un astre dont la parallaxe est de 1 seconde d'arc :

$$1 \text{ pc} = 3,26 \text{ AL}$$

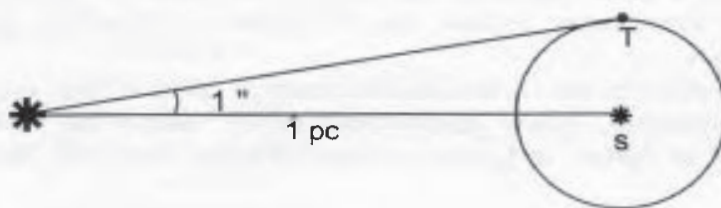


Figure I.1 - Parallaxe : angle dont on voit une distance donnée, ici la distance Terre-Soleil (T-S)

Une représentation de la Voie Lactée est donnée ci-dessous. La plus grande partie des étoiles forme un disque renflé en son centre, appelé centre galactique, d'environ 2 mille parsecs de diamètre. Des bras spiraux partent de ce centre. Dans l'un d'entre eux, à 8 kpc de distance, se trouve notre étoile, le Soleil. Celui-ci tourne autour du centre galactique avec une vitesse d'environ 250 km/s et en fait le tour en 230 millions d'années.



Figure I.2 – Notre Galaxie ou Voie Lactée, comme on peut se l'imaginer en fonction d'autres galaxies spirales.

Pour tenter de saisir les distances énormes que l'on rencontre en astronomie, on peut se référer aux deux figures ci-dessous.

En comparant la Terre à un grain de sable de 1 mm de diamètre, la distance Terre-Soleil serait de 12,5 m, le Soleil étant alors une sphère de 12 cm de diamètre environ.

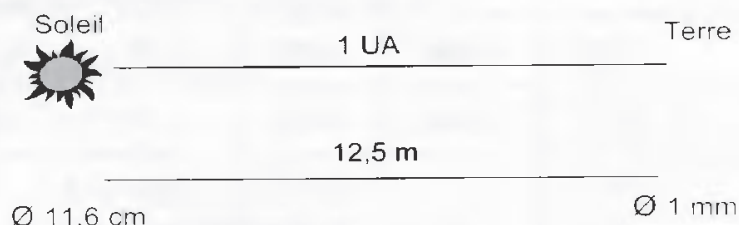


Figure 1.3

Si on assimile le diamètre du disque de notre Galaxie à la distance séparant Paris de New-York, la distance Soleil-Terre est de l'ordre du millimètre.

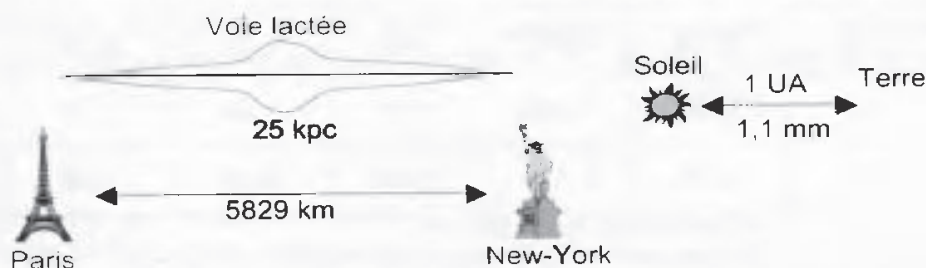


Figure 1.4

distance Terre-Lune	384 400 km
étoile la plus proche du Soleil : Proxima Centauri	4,25 AL
galaxie la plus proche : nébuleuse d'Andromède	2 M AL

Tableau 1.1 – Quelques distances "astronomiques"

Quelques estimations du temps écoulé		
âge de l'Univers	15 milliards d'années	24 h
âge du système solaire	4,5 milliards d'années	8 h
apparition des mammifères	200 millions d'années	19 min
apparition des premiers hominidés	3 millions d'années	17 s
apparition de l'homo sapiens	200 000 ans	1 s

Tableau 1.2 – En considérant l'âge de l'Univers égal à une journée, la colonne de droite indique les autres durées rapportées à cette journée.

Le tableau I.3 ci-dessous donne quelques caractéristiques des 9 planètes du système solaire dont la somme des masses ne représente cependant que 1/1000 de la masse du système solaire.

nom	symbole	distance	diamètre	masse	masse volumique	champ gravitationnel	période
Mercure	☿	0,39	0,382	0,055	5,42	0,39	88 j
Vénus	♀	0,72	0,949	0,815	5,25	0,88	225 j
Terre	⊕	1	1	1	5,52	1	1 a
Mars	♂	1,52	0,532	0,107	3,94	0,38	1 a 322 j
Jupiter	♃	5,20	11,209	317,9	1,33	2,34	11 a 315 j
Saturne	♄	9,54	9,449	95,2	0,69	0,93	29 a 167 j
Uranus	♅	19,19	4,007	14,5	1,29	0,79	84 a 3 j
Neptune	♆	30,06	3,883	17,1	1,64	1,12	164 a 288 j
Pluton	♇	39,53	0,179	0,002	2,05	0,06	248 a 217 j

distance :

diamètre :

masse :

masse volumique :

champ gravitationnel :

période :

moyenne au soleil (en UA)

équatorial, relatif à celui de la Terre = 12 757 km

relative à celle de la Terre = $5,98 \cdot 10^{24}$ kg

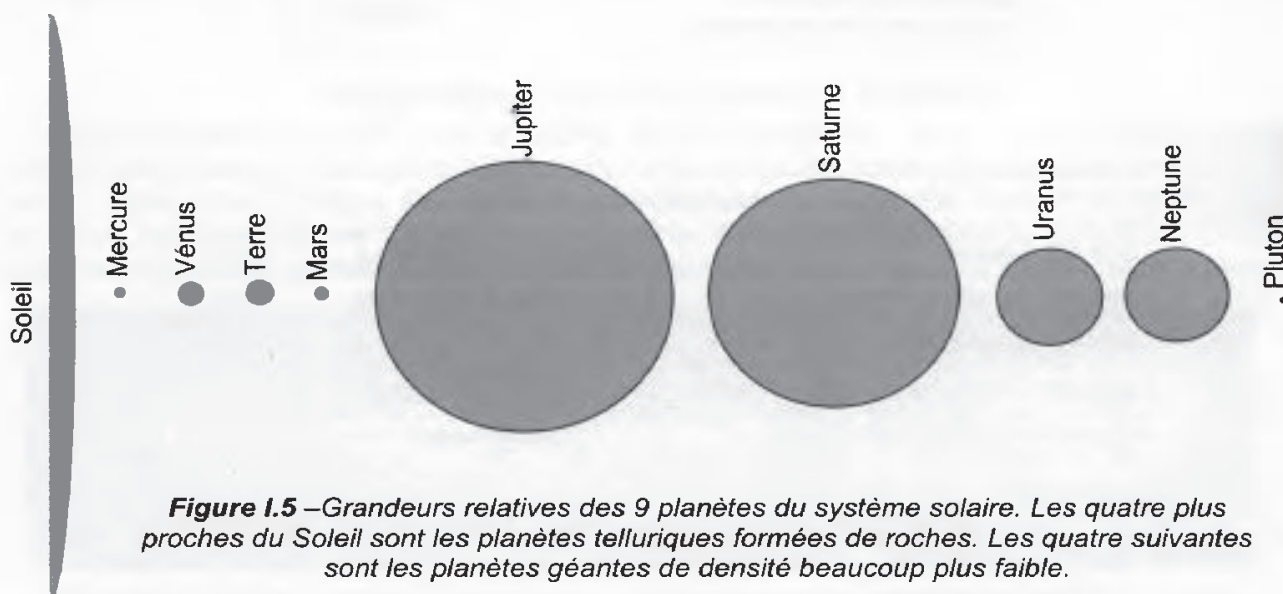
moyenne (en g/cm³)

accélération de la pesanteur moyenne à l'équateur rapportée à celle de la Terre (9,78 m/s²)

temps mis par la planète pour accomplir une révolution autour du soleil appelée *révolution sidérale* (a = ans, j = jours)

Tableau I.3 – Caractéristiques des planètes du système solaire.

Tableau I.3 – Caractéristiques des planètes du système solaire.



2. LE SOLEIL

Sur le plan cosmogonique le soleil est une étoile quelconque (de type spectral G2 V) dont ni les propriétés physiques ni la position ne la distinguent des milliards d'autres étoiles formant la Galaxie. Sur le plan humain cette étoile a une importance primordiale puisque sans elle la vie n'existerait pas sur terre.

caractéristique	valeur
masse	$1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
diamètre	$1,392 \cdot 10^9 \text{ m}$
masse volumique moyenne	1410 kg/m^3
magnitude absolue	+4,83
magnitude apparente	-26,74
puissance rayonnée	$3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$
température superficielle	5770 K

Tableau 1.4 – Caractéristiques principales du Soleil

La *magnitude* m d'une étoile définit son éclat¹ apparent. L'échelle permet de comparer deux astres lumineux, de magnitude m_1 et m_2 suivant la formule, dite de Pogson :

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log \left(\frac{E_1}{E_2} \right)$$

où E_1 et E_2 sont les éclats respectifs². Par exemple si l'étoile 1 est 100 fois plus lumineuse que l'étoile 2, sa magnitude m_1 sera diminuée de 5 par rapport à m_2 . Cette valeur de m est appelée *magnitude apparente*. Le zéro de l'échelle est défini en fixant arbitrairement la magnitude d'une étoile de référence³.

Les astronomes parlent de *magnitude absolue* M d'une étoile comme étant la magnitude apparente de celle-ci placée à une distance de 10 parsecs. Comme les éclats E sont proportionnels au carré des distances d , on peut écrire :

$$M - m = -2,5 \log \left(\frac{d^2}{100} \right) = -5 \log(d) + 5$$

avec d exprimée en parsec.

Dans le cas du Soleil, $d=1 \text{ UA} = \frac{1}{3,26 \times 63240} = 4,85 \cdot 10^{-6} \text{ pc}$ et $m=-26,74$. On obtient :

$$M = -26,74 - 5 \log(4,85 \cdot 10^{-6}) + 5 = 4,83.$$

La structure du soleil est schématisée à la figure 1.6. On distingue quatre zones particulières; le *noyau*, la *photosphère*, la *chromosphère* et la *couronne*.

C'est dans le **noyau** que se produisent les réactions nucléaires de fusion libérant une énergie considérable. La densité du noyau est très élevée ($\approx 10^5 \text{ kg/m}^3$) ainsi que sa température (15 millions de degrés) et sa pression ($2 \cdot 10^{11} \text{ bars}$). Ce sont les conditions

¹ L'éclat d'un astre caractérise la sensation lumineuse de la rétine. Ce terme est à l'origine de la notion de *magnitude visuelle* grâce à la loi physiologique de Fechner : la sensation est proportionnelle au logarithme de l'excitation. La valeur de la magnitude dépend du récepteur. Quand on utilise une émulsion photographique on parle de *magnitude photographique*.

² Il s'agit dans cette expression du logarithme à base 10.

³ Pour se rapprocher de l'échelle définie par Ptolémée, on a par exemple choisi d'affecter une magnitude apparente de +2,15 à l'Étoile Polaire.

nécessaires à l'entretien des réactions nucléaires. La densité diminuant avec l'éloignement au centre, les réactions nucléaires cessent de se produire à une distance estimée à un quart du rayon solaire, soit 175 000 km environ. C'est le rayon de la bombe thermonucléaire qui nous donne la vie.

L'énergie produite se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.

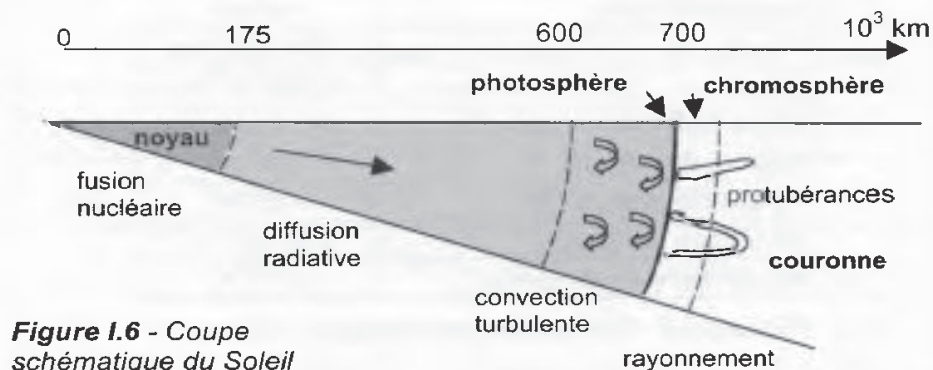


Figure 1.6 - Coupe schématique du Soleil

Compte tenu de la masse considérable du Soleil et des lois de la pesanteur, toute particule devrait être attirée inexorablement vers le centre et le Soleil devrait s'effondrer sur lui-même. Pourquoi notre étoile est-elle stable ? Pour répondre à cette question il faut s'intéresser à sa genèse.

Le soleil est né de la contraction de matière stellaire, gaz et poussières. Devenant de plus en plus dense à cause de l'attraction gravitationnelle, il est devenu de plus en plus opaque. Ainsi la chaleur engendrée par sa contraction, ne pouvant plus être évacuée par rayonnement, le cœur commença à s'échauffer pour atteindre quelques millions de degrés, températures d'amorçage des réactions nucléaires. L'énergie supplémentaire ainsi dégagée fit monter encore la température jusqu'à 15 millions de degrés kelvin. À cette température, les forces de pression de radiation et d'agitation de la matière s'opposent à la force gravitationnelle. La matière étant stabilisée, le soleil cessa de se contracter.

La **photosphère** est une couche d'environ 300 km d'épaisseur avec une température de 5770 K. Elle donne l'image visible du soleil. Sa surface apparaît granuleuse à cause de cellules de convection irrégulières dues à la remontée de bulles de fluide chaud venant y mourir et qui retombent ensuite vers des couches plus profondes. D'environ 1000 km de diamètre, ces cellules ont la forme de *grains de riz* qui peuvent durer quelques minutes. La photosphère apparaît donc comme une surface bouillonnante.

On y observe aussi des *taches* qui constituent l'aspect le plus évident de l'activité solaire. Ces taches correspondent à une température moindre (4500 K) ce qui les fait apparaître de couleur sombre. Elles sont sources d'un très important champ magnétique. C'est grâce à l'observation du mouvement apparent de ces taches que l'on a pu déterminer la période de rotation du Soleil : 25 jours et 9 heures à l'équateur et 30 jours aux pôles. Cette rotation différentielle de la couche superficielle du soleil montre que celui-ci ne se comporte pas comme un solide ; il possède une surface fluide. L'astronome suisse Wolf (1816-1893) a compilé toutes les observations faites depuis Galilée au sujet des taches solaires et a pu mettre en évidence un cycle d'activité d'environ 11 ans.

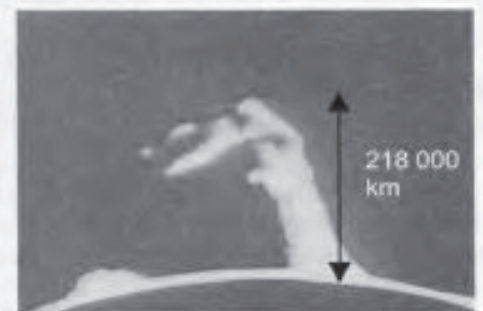


Figure 1.7 - Protubérance solaire

La **chromosphère** est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ 8 000 km et une température de 20 000 K environ. Le spectre de la chromosphère, analysé par Joseph von Fraunhofer en 1868, mit en évidence la présence d'un élément inconnu à cet époque et baptisé hélium en l'honneur du soleil (Hélios pour les Grecs). Visible lors d'une éclipse totale, la chromosphère est le siège de *protubérances*, jets de gaz pouvant atteindre plusieurs centaines de milliers de km comme le montre la figure I.7.

Lors d'un maximum d'activité solaire, des particules très énergétiques (protons, électrons) et d'intenses flux de rayonnement X et UV sont envoyés dans l'espace et peuvent atteindre la Terre. Ces *orages magnétiques* créent un *vent solaire* qui peut déformer la magnétosphère et entraîner la destruction de satellites, compromettre des vols spatiaux, perturber les communications radio et même créer de dangereuses surtensions dans les grands réseaux électriques terrestres. Ils sont aussi à l'origine des fameuses *auroras polaires* dues à l'interaction des particules de grande énergie avec les molécules de la haute atmosphère terrestre. Les particules ionisées sont alors canalisées par les lignes du champ magnétique terrestre. Ces lignes étant beaucoup plus resserrées aux pôles, c'est là qu'on observe les aurores boréales ou australes.

La **couronne** est le prolongement de la photosphère. Sans limite précise, elle est formée de gaz peu denses et ionisés. Invisible depuis la Terre, car son éclat se confond avec celui du ciel bleu, elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire. Sa température est très élevée puisqu'elle dépasse le million de degrés. Il semble que l'énergie fournie pour atteindre une telle température soit d'origine magnétique. Les progrès obtenus dans l'étude du soleil et en particulier de sa couronne sont le résultat des analyses réalisées par des instruments en orbite. Les spectres UV et X de la couronne peuvent en effet y être analysés, ce qui est impossible à la surface de la Terre, l'atmosphère étant opaque pour ces longueurs d'onde. Et comme la photosphère et la chromosphère n'émettent pas dans les bandes UV et X, on peut photographier entièrement la couronne sans être gêné par le rayonnement des couches inférieures de notre étoile.



Figure I.8 - Éclipse de soleil montrant la couronne

L'analyse du *spectre continu* de la lumière émise par la photosphère montre des raies sombres. Celles-ci sont la preuve de l'existence de différents éléments présents en particulier dans la chromosphère. En effet à l'état gazeux, tout élément émet et absorbe un spectre qui lui est propre et que l'on peut déterminer en laboratoire. La présence de certaines raies fournit une indication sur l'existence de certains éléments et la largeur des raies une indication sur l'abondance de ces éléments. L'étude des raies d'absorption du spectre de la photosphère permet de remonter à la composition chimique de l'atmosphère solaire. On y décèle ainsi la présence d'hydrogène, de fer, de calcium, de magnésium, de sodium, de nickel...

Une représentation schématique du système Soleil-Terre est donnée à la figure I.9. Le Soleil, limité à la photosphère, est vu de la Terre sous un angle de 32 minutes d'arc environ (variable de 31,5° à 32,6°). Une chance pour les astronomes est que cet angle correspond à quelque chose près à celui dont on peut voir la Lune de la Terre; ce dernier varie en effet de 28,5° à 33,5°. Cette propriété permet d'obtenir, de temps en temps, des éclipses totales du soleil. Il est alors possible, depuis la Terre, d'étudier la couronne du soleil grâce à l'occultation par la Lune de la photosphère solaire.

L'orbite de la Terre autour du Soleil définit un plan que l'on appelle *plan de l'écliptique* car les éclipses de soleil ne peuvent se produire que si la Lune s'y trouve. La trajectoire de la Terre dans ce plan est une ellipse de faible excentricité. Lorsque la Terre est au plus près du soleil (vers le 15 janvier), on parle de *périhélie*. La distance Terre-Soleil est dans ce cas de 147 100 000 km. Quand la Terre est le plus éloignée du Soleil (vers la fin juin), on parle d'*aphélie*. La distance Terre-Soleil est alors de 152 100 000 km

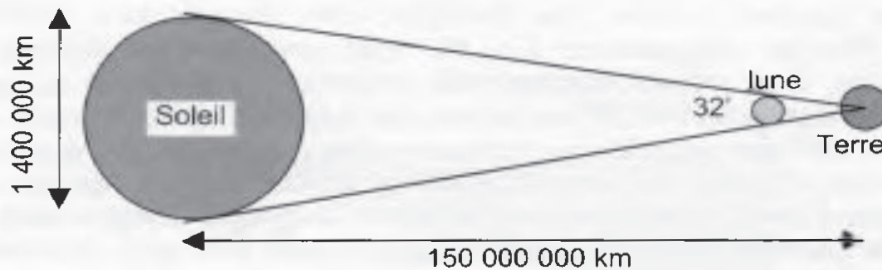


Figure 1.9
Schéma des dimensions du système Soleil-Terre (valeurs arrondies)

* Application I.1

Cherchons à déterminer la masse M_S du Soleil.

La Terre (T), de masse M_T , évolue autour du Soleil (S) à une vitesse sensiblement constante : $V \approx 30$ km/s. Son orbite est pratiquement circulaire, de rayon $R = 1$ UA. Considérons les repères $R_1(S, \vec{x}_1, \vec{y}_1)$ fixe et $R_2(S, \vec{x}_2, \vec{y}_2)$ en rotation uniforme avec $(\vec{x}_1, \vec{x}_2) = \theta$, comme indiqué à la figure ci-contre.

Le vecteur position de la Terre par rapport à R_1 s'écrit :

$$\vec{ST} = R \vec{x}_2$$

La vitesse de la Terre par rapport au repère R_1 est donnée par :

$$\left. \frac{d\vec{ST}}{dt} \right|_{R_1} = R \dot{\theta} \vec{y}_2 = V \vec{y}_2$$

Son accélération, toujours par rapport à ce même repère R_1 , s'écrit :

$$\left. \frac{d^2\vec{ST}}{dt^2} \right|_{R_1} = -V \dot{\theta} \vec{x}_2 = -\frac{V^2}{R} \vec{x}_2 \quad \text{puisque} \quad V = R \dot{\theta}$$

On peut considérer en première approximation que la Terre n'est soumise qu'à la seule force d'attraction gravitationnelle du Soleil que l'on peut écrire :

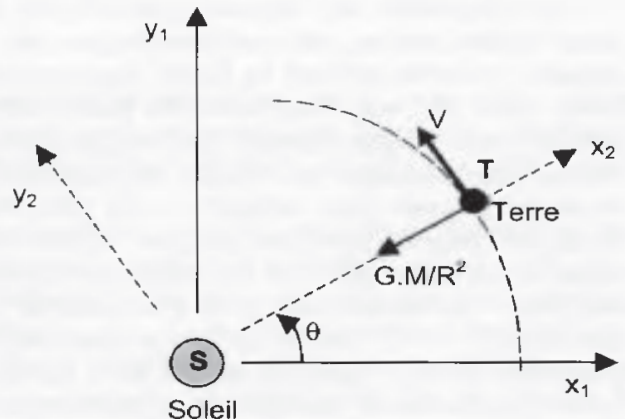
$$\vec{F} = -G \frac{M_T \cdot M_S}{R^2} \vec{x}_2 \quad \text{où } G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} \text{ est la constante universelle de gravitation.}$$

En considérant le repère R_1 galiléen, le principe fondamental de la mécanique permet d'écrire

$$M_T \left. \frac{d^2\vec{ST}}{dt^2} \right|_{R_1} = \vec{F}$$

$$\text{soit} \quad -M_T \frac{V^2}{R} \vec{x}_2 = -G \frac{M_T \cdot M_S}{R^2} \vec{x}_2 \quad \text{ou encore :} \quad \frac{V^2}{R} = G \frac{M_S}{R^2}$$

$$\text{On en déduit la masse } M_S \text{ du Soleil :} \quad M_S = \frac{V^2 R}{G} = \frac{(30000)^2 \cdot 1,5 \cdot 10^{11}}{6,672 \cdot 10^{-11}} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

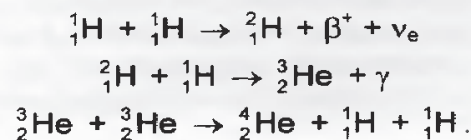


3. L'ÉNERGIE SOLAIRE

3.1 Origine

L'énergie solaire provient de la fusion d'hydrogène en hélium au sein du noyau de notre étoile. Deux cycles ont été imaginés par les astrophysiciens pour décrire les étapes conduisant à cette fusion.

- Le *cycle proton-proton* fournit 90% de l'énergie solaire. Les réactions nucléaires régissant ce cycle sont données, dans 91% des cas¹, par les équations ci-dessous². La notation ${}^1_1\text{H}$ représente le noyau de l'atome d'hydrogène 1, c'est-à-dire un proton. Il y a émission de *positons* β^+ (rayonnement *bêta*), de *neutrinos* ν_e et de *photons* γ (rayonnement électromagnétique).



- Le *cycle du carbone* (ou *cycle de Bethe*) fournit les 10% restants. Ce cycle peut être schématisé par le diagramme ci-dessous.

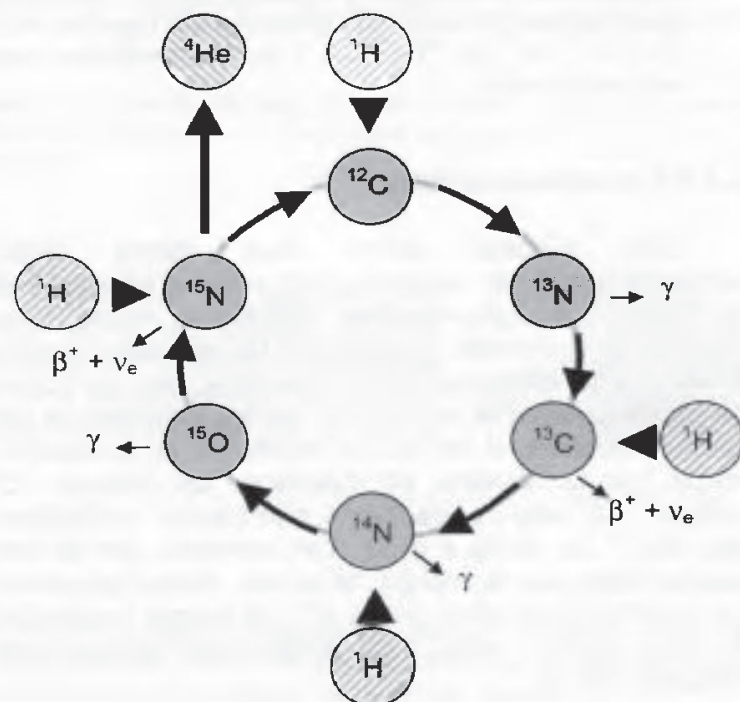
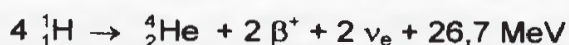


Figure I.10 – Cycle du carbone (ou cycle de Bethe) : globalement, 4 noyaux d'hydrogène se transforment en un noyau d'hélium avec émission de 3 photons γ , de 2 positons β^+ et de 2 neutrinos ν_e .

¹ Dans 9 % des cas, les réactions sont plus complexes et font intervenir des noyaux de béryllium 7 et 8, de lithium 7 et de bore 8.

² Un atome est représenté par l'écriture ${}^A_Z\text{X}$ où X est le symbole chimique du corps ; A, appelé *nombre de masse*, correspond au nombre de *nucléons* constituant le noyau de l'atome ; Z, appelé *nombre atomique*, représente le nombre d'électrons tournant autour du noyau de l'atome électriquement neutre.

On peut résumer ces deux cycles par l'équation globale suivante (en omettant le rayonnement γ) :



Quatre protons fusionnent pour donner naissance à un noyau d'hélium avec émission de deux positons β^+ , de deux neutrinos ν_e , accompagnés d'une énergie égale à 26,7 MeV¹.

* Application I.2

Déterminons l'énergie libérée par la fusion de quatre noyaux d'atomes d'hydrogène (protons). Si l'on mesure la masse des produits de la réaction de fusion et qu'on la compare à celle de l'hydrogène qui entre en jeu dans celle-ci, on constate un défaut de masse Δm .

Avec les valeurs suivantes :

masse du proton (${}^1_1\text{H}$) : $1,672648 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$,

masse du noyau d'hélium (${}^4_2\text{He}$ ou particule α) : $6,646424 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$,

et en négligeant la masse des positons, on trouve un défaut de masse :

$$\Delta m = 4 \times 1,672648 \cdot 10^{-27} - 6,646424 \cdot 10^{-27} = 0,044168 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Cette matière qui a disparue s'est transformée en énergie suivant la relation :

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

où c est la vitesse de la lumière : $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$

On en déduit donc l'énergie libérée :

$$E = 0,044168 \cdot 10^{-27} \times (299\,792\,458)^2 = 3,97 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

Exprimons cette énergie en MeV (méga-électron-volt).

$$\text{On trouve : } E = 3,97 \cdot 10^{-12} / 1,6 \cdot 10^{-13} = 24,8 \text{ MeV}$$

La différence par rapport à la valeur de 26,7 MeV donnée plus haut vient de ce que les cycles réels (proton-proton et du carbone) sont complexes et font intervenir des corps intermédiaires (${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$, ${}^{12}\text{C}$, ...) qui n'apparaissent pas dans la réaction globale utilisée dans cette application.

3.2 La constante solaire

Une surface plane d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire et située à la limite de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance rayonnée fonction de la distance Soleil-Terre. Cette distance variant quelque peu au cours de l'année, compte tenu de la légère excentricité de l'orbite terrestre, il en est de même de la puissance reçue par la surface en question. Le tableau I.5 indique les valeurs de cette puissance surfacique pour le 1^{er} de chaque mois. On constate que le flux solaire varie peu au cours du temps. Aussi appelle-t-on *constante solaire*, notée C^* , la valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite de l'atmosphère terrestre. On a :

$$C^* = 1353 \text{ W/m}^2$$

L'écart relatif du flux solaire par rapport à cette constante solaire est donné au tableau I.5.

date le 1 ^{er}	Puissance surfacique W/m ²	écart relatif en % / C^*
janvier	1399	+ 3,40
février	1394	+ 3,03
mars	1379	+ 1,92
avril	1354	+ 0,07
mai	1333	- 1,48
juin	1312	- 3,03
juillet	1308	- 3,33
août	1312	- 3,03
septembre	1329	- 1,77
octobre	1350	- 0,22
novembre	1373	+ 1,48
décembre	1392	+ 2,88

Tableau I.5 – Valeur du flux solaire à la limite de l'atmosphère terrestre. Écart relatif par rapport à la constante solaire $C^* = 1353 \text{ W/m}^2$.

¹ 1 MeV = $1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$

On y constate que cet écart ne dépasse pas 3,4% en valeur absolue.

* Application I.3

Déterminons la puissance P^* rayonnée par le soleil.

Prenons pour le flux solaire la valeur moyenne de 1353 W par m^2 de surface réceptrice perpendiculaire aux rayons solaires (à la limite de l'atmosphère terrestre). Considérons une sphère centrée sur le soleil ayant un rayon égal à l'unité astronomique (1 UA = 150 millions de km). La puissance rayonnée par le soleil, supposée isotrope, c'est-à-dire identique dans toutes les directions, est égale à la surface de cette sphère multipliée par la constante solaire.

$$P^* = 4 \pi (150 \cdot 10^9)^2 \times 1353 = 3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Notons que le résultat précédent fut obtenu en 1827 par le physicien français Mathias Pouillet et l'Anglais John Herschel et qu'il entraîna une question de fond sur l'origine de l'énergie solaire : quel phénomène pouvait bien libérer une telle puissance ? À l'époque la fusion nucléaire n'était pas connue...

Autre problème : quelle est la température de la surface visible du soleil ? C'est en 1878, grâce à la théorie de l'émission du corps noir due à Josef Stefan, que celle-ci fut estimée à 6000 K.

* Application I.4

Déterminons la température de la photosphère.

La connaissance de la puissance émise par le Soleil permet de remonter à la température de sa surface considérée comme un corps noir. En effet la puissance P_{CN} émise par un CN à la température T s'écrit¹ :

$$P_{CN} = \sigma T^4 S$$

avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (constante de Stefan-Boltzman), T la température en kelvin de la surface rayonnante et S la valeur de cette surface en m^2 . On a dans notre cas :

$$3,83 \cdot 10^{26} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 \cdot 4 \pi (0,696 \cdot 10^9)^2$$

ce qui donne $T = 5772 \text{ K}$

Le soleil diffère quelque peu d'un corps noir. On observe une diminution de la luminosité près des bords du disque solaire, phénomène appelé assombrissement du limbe. Celui-ci provient du fait que la lumière qui nous parvient de la périphérie du disque est émise par des couches moins chaudes correspondant à la partie supérieure de la photosphère.

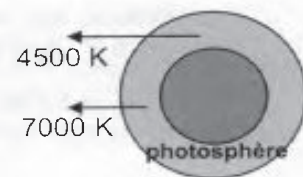


Figure I.11

3.3 Vie et mort du Soleil

L'énergie rayonnée par le Soleil entraîne une perte de masse de celui-ci, compte tenu de la relation entre masse et énergie déjà utilisée à l'application I.2. Cette énergie s'en va se perdre dans l'espace. La planète Terre en reçoit une infime partie.

* Application I.5

Déterminons la masse de matière perdue chaque seconde par le soleil.

Cette masse est perdue sous forme de rayonnement électromagnétique.

En utilisant la formule d'équivalence reliant la masse à l'énergie, $E = \Delta m \cdot c^2$, on obtient :

¹ On trouvera en annexe un formulaire sur les Échanges Thermiques utile en énergétique solaire.

$$\Delta m = \frac{P^*}{c^2} = \frac{3,83 \cdot 10^{26}}{(3 \cdot 10^8)^2} = 4,26 \cdot 10^9 \text{ kg}$$

Chaque seconde le Soleil perd 4 millions de tonnes de matière transformée en rayonnement électromagnétique.

Bien que le débit massique perdu par le Soleil soit considérable à notre échelle, il n'en reste pas moins très faible au vu de la masse de notre étoile. Si on considère que sa puissance est restée constante depuis sa naissance, il y a environ 5 milliard d'années, un calcul simple montre que la masse totale perdue ne représente que 0,034 % de sa masse totale. Le Soleil ne disparaîtra pas en tant que corps céleste. Mais ce qui compte pour un terrien, c'est que la constante solaire, qui régit la vie sur Terre, reste vraiment constante. Cette constante dépend directement du nombre de réactions de fusion et donc de la masse d'hydrogène encore présente au cœur du Soleil.

* Application I.6

Quelle peut être l'espérance de vie sur Terre, compte tenu de l'évolution du Soleil ?

On estime qu'actuellement celui-ci est constitué pour un tiers d'hélium et pour deux tiers d'hydrogène¹. Les astrophysiciens pensent que 8 % de cet hydrogène peut se transformer en hélium sans qu'une influence réelle se fasse sentir sur Terre, c'est-à-dire sans qu'il y ait une variation sensible de la constante solaire.

La quantité d'hydrogène pouvant être brûlé dans ces conditions s'élève à

$$1,989 \cdot 10^{30} \times \frac{2}{3} \times \frac{8}{100} = 1,06 \cdot 10^{29} \text{ kg} = 1,06 \cdot 10^{32} \text{ grammes}$$

Sachant que chaque gramme d'hydrogène renferme un nombre d'atomes égal au nombre d'Avogadro, à savoir $6,02 \cdot 10^{23}$, le nombre d'atomes d'hydrogène pouvant fusionner en hélium se monte à :

$$1,06 \cdot 10^{32} \times 6,02 \cdot 10^{23} = 6,4 \cdot 10^{55} \text{ atomes}$$

La fusion de 4 atomes d'hydrogène en un atome d'hélium libère une énergie égale à :

$$26,7 \text{ MeV} \quad \text{soit} \quad 26,7 \times 1,6 \cdot 10^{-13} = 4,27 \cdot 10^{-12} \text{ J.}$$

On en déduit l'énergie potentielle pouvant être libérée :

$$4,27 \cdot 10^{-12} \times \frac{6,4 \cdot 10^{55}}{4} = 6,84 \cdot 10^{43} \text{ J}$$

L'espérance de vie du soleil sera donnée en divisant cette énergie potentielle par la puissance P^* qu'il émet (en watts) :

$$\frac{6,84 \cdot 10^{43}}{3,83 \cdot 10^{26}} = 1,785 \cdot 10^{17} \text{ secondes soit } 5,66 \text{ milliards d'années.}$$

Quand l'hydrogène du noyau viendra à manquer, l'activité nucléaire du soleil baissera et sa température diminuera.

La pression de rayonnement ne compensant plus l'attraction gravitationnelle, la matière s'effondrera vers le noyau. C'est le phénomène de contraction gravitationnelle.

Le noyau devenant plus dense verra sa température remonter. À sa périphérie l'hydrogène restant continuera de brûler. Le cœur de notre étoile atteindra alors une température de 100 millions de degrés, valeur pour laquelle l'hélium peut fusionner pour donner du carbone. On a affaire au "flash" de l'hélium caractérisé par les réactions suivantes :



¹ Ceci est une estimation moyenne car la composition du Soleil n'est pas homogène. Le cœur, où se déroulent les réactions de fusion nucléaire, contient environ 40% en masse d'hydrogène alors qu'il y en a 75% en surface.



L'énergie libérée lors de cette fusion nucléaire étant considérable, le Soleil se dilatera, son diamètre atteignant 100 fois sa valeur actuelle en quelques dizaines de millions d'années seulement. Sa surface sera alors proche de la Terre.

Sa température de surface descendra à 3 000 K. Le soleil sera devenu une étoile géante rouge. Peu à peu il se refroidira tandis que la matière se dispersera dans l'espace. Il ne restera alors plus qu'un noyau petit mais chaud. Le soleil sera devenu une étoile naine blanche.

Son refroidissement continuera et il terminera sa vie d'astre comme naine noire, étoile invisible...

3.4 Spectre solaire

Le spectre du Soleil est continu, c'est-à-dire que les photons émis peuvent avoir toutes les énergies possibles et produire ainsi toutes les radiations imaginables mais selon des proportions très différentes selon la bande spectrale considérée.

On étudie le spectre de la lumière solaire à la limite de l'atmosphère terrestre en installant sur un satellite un *spectrohéliographe*. Cet appareil décompose la lumière reçue par un jeu de prismes. Plus la bande spectrale analysée, appelée *raie*, est réduite meilleure est la précision d'analyse. Pour une bande spectrale, de largeur $1\ \mu\text{m}$, centrée sur la longueur d'onde λ , on mesure la puissance rayonnée ce qui fournit la puissance spectrale E_λ appelée *émittance énergétique monochromatique*. Celle-ci est donnée en watts par mètre carré et micro-mètre ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$).

En faisant la somme des émittances monochromatiques sur tout le spectre, on obtient la constante solaire C^* . On définit alors la quantité D_λ par la formule suivante :

$$D_\lambda = \frac{\int_0^\lambda E_\lambda \, d\lambda}{\int_0^\infty E_\lambda \, d\lambda} = \frac{\int_0^\lambda E_\lambda \, d\lambda}{C^*}$$

Cette quantité correspond à la fraction d'énergie émise par le Soleil dans la bande spectrale $[0, \lambda]$.

Cette grandeur est intéressante pour connaître la puissance rayonnée dans une bande spectrale $[\lambda_1, \lambda_2]$ donnée. Il suffit pour cela d'écrire :

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda \, d\lambda = C^* (D_{\lambda_2} - D_{\lambda_1}).$$

Des mesures expérimentales ont permis de dresser le tableau I.6 qui donne, pour une longueur d'onde λ , l'émittance énergétique monochromatique E_λ ainsi que la quantité D_λ .

À partir de ce tableau, on peut tracer la figure I.12 qui représente le spectre du soleil à la limite de l'atmosphère terrestre. Si on y reporte le spectre du corps noir (CN) à la température de 5770 K, on s'aperçoit que les deux courbes sont très proches l'une de l'autre ce qui confirme le calcul effectué plus haut : le soleil peut être assimilé à un corps noir à 5770 K.

λ	E_λ	D_λ	λ	E_λ	D_λ	λ	E_λ	D_λ
0,115	0,007	10^{-4}	0,43	1639	12,47	0,90	891	63,37
0,14	0,03	$5 \cdot 10^{-4}$	0,44	1810	13,73	1,00	748	69,49
0,16	0,23	$6 \cdot 10^{-4}$	0,45	2006	15,14	1,20	485	78,40
0,18	1,25	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,46	2066	16,65	1,40	337	84,33
0,20	10,7	$8,1 \cdot 10^{-3}$	0,47	2033	18,17	1,60	245	88,61
0,22	57,5	0,05	0,48	2074	19,68	1,80	159	91,59
0,23	66,7	0,10	0,49	1950	21,25	2,00	103	93,49
0,24	63,0	0,14	0,50	1942	22,60	2,20	79	94,83
0,25	70,9	0,19	0,51	1882	24,01	2,40	62	95,86
0,26	130	0,27	0,52	1833	25,38	2,60	48	96,67
0,27	232	0,41	0,53	1842	26,74	2,80	39	97,31
0,28	222	0,56	0,54	1783	28,08	3,00	31	97,83
0,29	482	0,81	0,55	1725	29,38	3,20	22,6	98,22
0,30	514	1,21	0,56	1695	30,65	3,40	16,6	98,50
0,31	689	1,66	0,57	1712	31,91	3,60	13,5	98,72
0,32	830	2,22	0,58	1715	33,18	3,80	11,1	98,91
0,33	1059	2,93	0,59	1700	34,44	4,00	9,5	99,06
0,34	1074	3,72	0,60	1666	35,68	4,50	5,9	99,34
0,35	1093	4,52	0,62	1602	38,10	5,00	3,8	99,51
0,36	1068	5,32	0,64	1544	40,42	6,00	1,8	99,72
0,37	1181	6,15	0,66	1486	42,66	7,00	1,0	99,82
0,38	1120	7,00	0,68	1427	44,81	8,00	0,59	99,88
0,39	1098	7,82	0,70	1369	46,88	10,0	0,24	99,94
0,40	1429	8,73	0,72	1314	48,86	15,0	$4,8 \cdot 10^{-2}$	99,98
0,41	1751	9,92	0,75	1235	51,69	20,0	$1,5 \cdot 10^{-2}$	99,99
0,42	1747	11,22	0,80	1109	56,02	50,0	$3,9 \cdot 10^{-4}$	100,00

λ en μm E_λ en $\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$ D_λ en % (d'après Thekaekara - 1974)

Tableau I.6 – Spectre solaire.

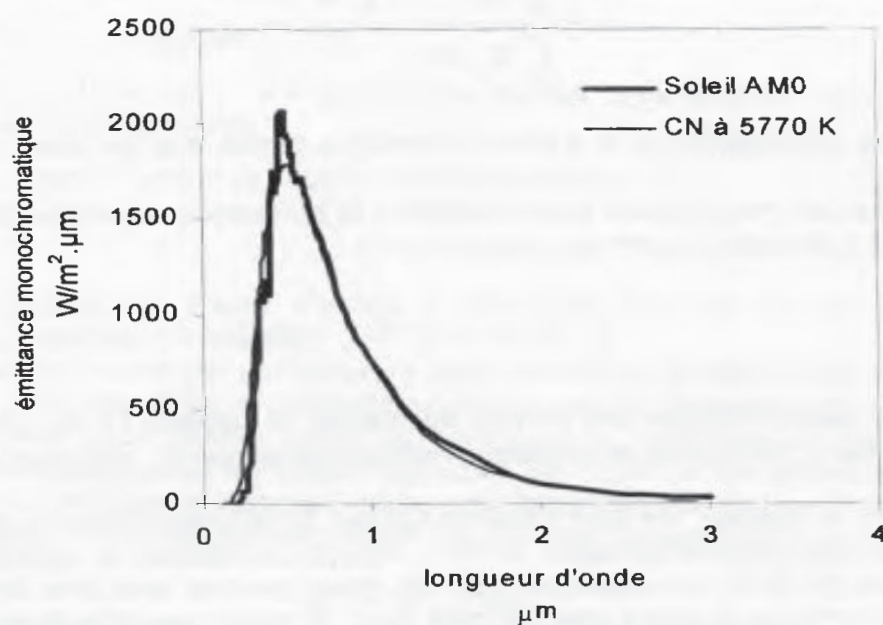


Figure I.12 - Spectre du soleil à la limite de l'atmosphère terrestre (AM0) auquel a été superposé le spectre du corps noir à 5770 K

Le spectre donné à la figure I.12 correspond à l'énergie émise par le Soleil dans le domaine de la lumière visible ce qui ne représente somme toute qu'une infime partie de l'échelle des longueurs d'onde comme on peut s'en apercevoir à la figure I.13. Il faut noter qu'une partie de son énergie est émise dans la gamme des rayons X, UV et aussi dans la gamme des ondes radio-électriques. Mais les puissances mises en jeu dans ces bandes spectrales sont très petites comparées à celle émise en lumière visible.

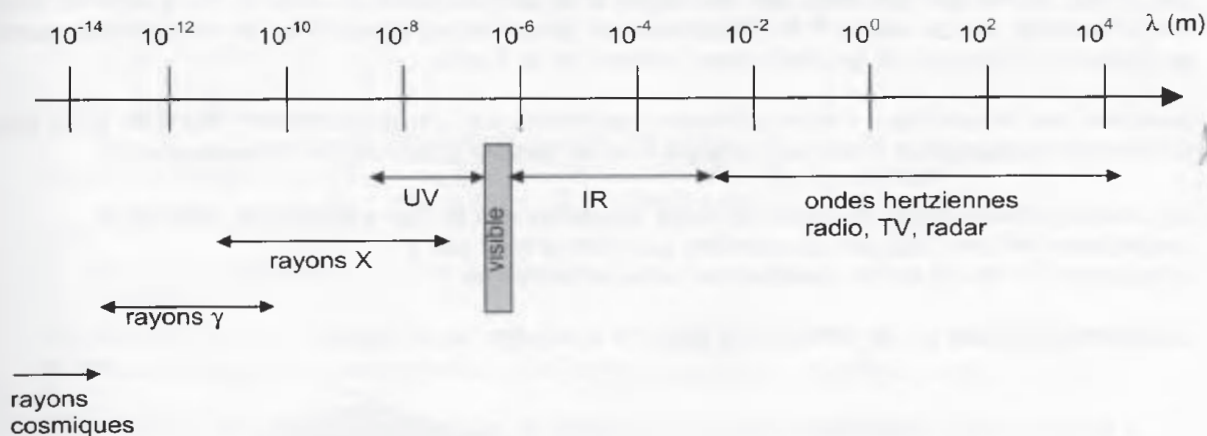


Figure I.13 - Échelle des longueurs d'onde depuis les rayons cosmiques jusqu'aux ondes radar.

* Application I.7

Déterminons la puissance solaire par bande spectrale.

Considérons trois bandes spectrales caractérisant le spectre solaire : une bande ultraviolet (UV), une bande visible (de $0,38 \mu\text{m}$ à $0,72 \mu\text{m}$) et une bande infra-rouge (IR).

Il est facile de déterminer l'importance énergétique de chacune de ces bandes.

Le calcul de la fraction du rayonnement se situant dans l'UV correspond à la valeur de D_λ lue au tableau du spectre solaire et correspondant à l'énergie émise dans la bande spectrale $[0 - 0,38 \mu\text{m}]$. On lit 7 %. Pour la bande visible cette fraction est égale à la différence $D_{0,72} - D_{0,38}$. On lit $D_{0,72} = 48,86$ %. On en déduit la fraction d'énergie dans le visible : $48,86 - 7 = 41,9$ %.

Ces résultats sont rappelés dans le tableau ci-dessous. On y trouve aussi la puissance reçue dans chacune de ces trois bandes spectrales et dont la somme correspond à la constante solaire $C^* = 1353 \text{ W/m}^2$.

	UV	visible	IR	Σ
%	7,0	41,9	51,1	100
W/m ²	95	566	692	1353

La bande spectrale des UV peut être découpée en trois parties au regard de leur interaction avec les cellules de la peau : les UV-A $[0,32 - 0,38]$ qui sont facilement arrêtés par le derme ; les UV-B $[0,28 - 0,32]$ qui le sont par l'épiderme et enfin les UV-C $[0 - 0,28]$ qui le sont (heureusement) par la couche d'ozone.

Pour s'affranchir de l'atmosphère terrestre perturbatrice, l'étude du Soleil est réalisée de plus en plus souvent grâce à des engins spatiaux : satellites, sondes et télescopes spatiaux. Citons comme exemples : le télescope ATM (Apollo Telescope Mount) qui avait été monté sur Skylab (NASA) en 1973, la sonde Ulysse (ESA) placée en orbite par la

navette américaine en 1990 avant d'être dirigée vers le Soleil, le satellite SoHO (Solar and Heliospheric Observatory) réalisé par la NASA (National Aeronautical Space Agency) américaine et l'ESA (European Space Agency) et lancé en 1995...

* Application I.8

Étude d'un satellite.

Soit un satellite artificiel en orbite autour de la Terre à une altitude de 600 km. Supposons que le système formé par la Terre et l'atmosphère terrestre puisse être considéré comme un corps noir sphérique de 6400 km de rayon à la température de 249 K. Ce système baigne dans l'espace, corps noir à 3 K. Cherchons la température d'équilibre de ce satellite quand il se trouve du côté éclairé ou bien dans l'ombre de la Terre.

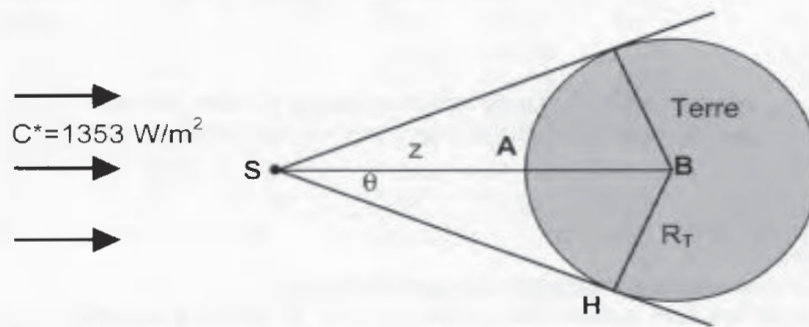
Données sur le satellite : corps sphérique isotherme de 2 m de diamètre ; surface grise ayant un facteur d'absorption infrarouge $\varepsilon = \alpha = 0,6$ et un facteur d'absorption solaire $\alpha^* = 0,4$.

On note θ le demi-angle au sommet sous lequel on voit la Terre depuis le satellite S.

La distance AS est l'altitude du satellite que l'on notera par z .

On a donc $BS = R_T + z$ où R_T représente le rayon terrestre.

Considérons le cas où le satellite est du côté ensoleillé de la Terre.



Écrivons l'équation de bilan thermique par échanges radiatifs.

L'apport solaire est égal à la puissance incidente correspondant à la constante solaire C^* multipliée par la surface réceptrice normale au rayonnement, c'est-à-dire πR^2 , surface correspondant au maître-couple du satellite, R étant le rayon du satellite supposé sphérique. Le résultat doit être affecté du coefficient d'absorption solaire α^* correspondant à la fraction de l'énergie incidente qui est absorbée par la surface réceptrice. Cet apport solaire est donc finalement égal à : $\alpha^* C^* \pi R^2$.

L'énergie rayonnée par le satellite, supposé être un corps gris (c.-à-d. rayonnant de façon isotrope), de surface émettrice S_s est égale à :

$\varepsilon \sigma T^4 S_s = \varepsilon \sigma T^4 4 \pi R^2$ où ε représente la fraction d'énergie émise par la surface grise sur ce qu'elle émettrait si c'était un corps noir.

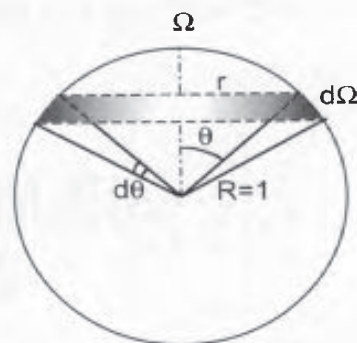
La Terre considérée comme un corps noir à la température T_T rayonne une puissance égale à σT_T^4 . Une fraction seulement de cette énergie est reçue par le satellite. Cette fraction est appelée facteur de forme ; on la note F_{TS} . De la même façon, la fraction du rayonnement émis par le satellite et reçue par la Terre est notée F_{ST} . On démontre, à partir de cette définition, que $S_T \cdot F_{TS} = S_s \cdot F_{ST}$ où S_T et S_s sont les surfaces respectives de la terre et du satellite. L'énergie rayonnée par la Terre et reçue par le satellite s'écrit donc :

$$\sigma T_T^4 \cdot S_T \cdot F_{TS} = \sigma T_T^4 \cdot S_s \cdot F_{ST} = \sigma T_T^4 \cdot 4 \pi R^2 \cdot F_{ST}$$

En considérant le satellite comme ponctuel, le facteur de forme F_{ST} est proportionnel à l'angle solide Ω (mesuré en stéradian) centré sur le satellite et intercepté par la sphère terrestre.

On appelle angle solide Ω la surface, mesurée sur la sphère unité, de la calotte sphérique définie par le demi-angle au sommet θ .

Le schéma ci-contre permet d'écrire l'expression de l'angle solide élémentaire $d\Omega$ (correspondant à un tronc de sphère) :
 $d\Omega = 2\pi r d\theta$ avec $r = \sin \theta$.



La valeur de Ω est obtenue par intégration : $\Omega = \int_0^\theta d\Omega$

Ce qui donne :

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos \theta)$$

Dans notre cas :

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta} = \sqrt{1 - \frac{R_T^2}{(R_T + z)^2}} = \sqrt{1 - \frac{6400^2}{(6400 + 600)^2}} = 0,40507$$

soit

$$\Omega = 2\pi (1 - 0,40507) = 3,738 \text{ stéradians.}$$

On en déduit $F_{ST} = \Omega / 4\pi$,

le dénominateur 4π correspondant à la surface totale de la sphère unité.

Revenons à l'énergie rayonnée par la Terre et reçue par le satellite. Elle est égale à :

$$\sigma T_T^4 \cdot 4\pi R^2 \cdot F_{ST} = \sigma T_T^4 \cdot \Omega R^2$$

La fraction de cette énergie absorbée par le satellite est égale à :

$$\alpha \sigma T_T^4 \cdot \Omega R^2$$

où α est le facteur d'absorption infrarouge de la surface du satellite.

Un raisonnement similaire peut être conduit pour déterminer l'énergie rayonnée par l'espace à la température T_∞ et absorbée par le satellite. On trouve :

$$\alpha \sigma T_\infty^4 (4\pi - \Omega) R^2$$

terme qui peut être négligé compte tenu de la faible température de l'espace.

Finalement, l'équation de bilan s'écrit :

$$\alpha^* C^* \pi R^2 - \varepsilon \sigma T^4 4\pi R^2 + \alpha \sigma T_T^4 \cdot \Omega R^2 = 0$$

La loi de Kirchhoff permet d'écrire $\varepsilon = \sigma$,

d'où :

$$T = \left[\frac{\alpha^* C^*}{\varepsilon 4\sigma} + T_T^4 \frac{\Omega}{4\pi} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$T = \left[\frac{0,4}{0,6} \frac{1353}{4 \times 5,67 \cdot 10^{-8}} + 249^4 \frac{3,738}{4\pi} \right]^{0,25} = 267,5 \text{ K} = -5,5^\circ\text{C}$$

En réalité la Terre n'est pas un corps noir. Une partie du rayonnement solaire incident est réfléchi par l'atmosphère (principalement par les nuages) et par le sol terrestre. Cette quantité n'est pas négligeable puisqu'elle se monte en moyenne à plus de 30 %. Le satellite reçoit donc un rayonnement solaire en provenance de la Terre, appelé flux d'albédo. Ce flux modifie le bilan thermique étudié ci-dessus. Soit a^* la fraction de l'énergie solaire réfléchi de façon isotrope par la surface de l'atmosphère. Le flux d'albédo peut s'écrire approximativement sous la forme suivante, en W/m^2 :

$$\frac{a^* C^*}{\left(1 + \frac{z}{R_T}\right)^2}$$

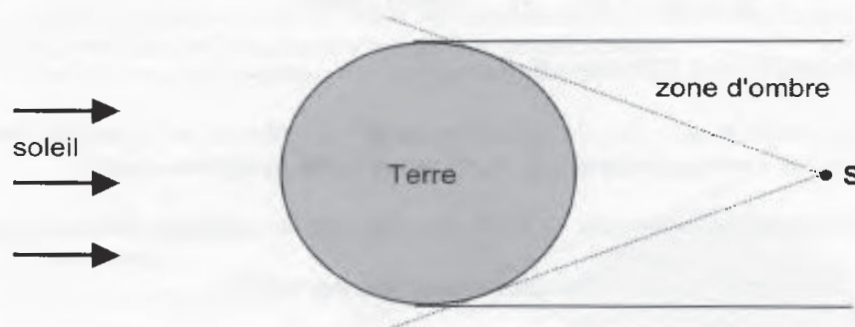
L'équation de bilan devient alors :

$$\alpha^* C^* \pi R^2 - \varepsilon \sigma T^4 4 \pi R^2 + \alpha \sigma T_T^4 \Omega R^2 + \alpha^* \frac{a^* C^*}{\left(1 + \frac{z}{R_T}\right)^2} \pi R^2 = 0$$

$$T = \left[\frac{\alpha^* C^*}{\varepsilon 4 \sigma} \left(1 + \frac{a^*}{\left(1 + \frac{z}{R_T}\right)^2} \right) + T_T^4 \frac{\Omega}{4 \pi} \right]^{\frac{1}{4}}$$

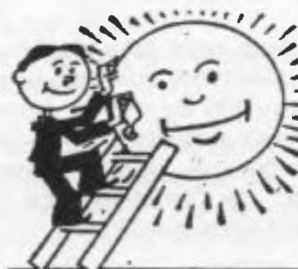
Avec $a^*=0,3$ le calcul donne $T=280 \text{ K} = 7^\circ\text{C}$.

Pour déterminer T dans le cas où le satellite se trouve dans l'ombre de la Terre, il suffit de supprimer le premier terme de l'équation de bilan.



La température d'équilibre se trouve alors fortement diminuée :

$$T = T_T \left[\frac{\Omega}{4 \pi} \right]^{\frac{1}{4}} = 249 \left[\frac{3,738}{4 \pi} \right]^{\frac{1}{4}} = 184 \text{ K} = -89^\circ\text{C}.$$



CHAPITRE II

LE COUPLE TERRE-SOLEIL

Véritable filtre, l'atmosphère terrestre modifie profondément le spectre du rayonnement solaire reçu au niveau du sol. Sans ce filtre la Vie, telle qu'on la connaît, n'aurait pas pu voir le jour, le rayonnement ultraviolet et le flux de particules cosmiques étant nocifs pour le développement des cellules vivantes.

1. L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE

1.1 Structure

Les ingénieurs, météorologues et autres scientifiques ont structuré l'atmosphère en différentes zones. Cette division peut sembler arbitraire mais relève de l'étude de certaines caractéristiques qui apparaissent suffisamment différentes pour entraîner ce découpage. C'est le cas par exemple de la température.

Du sol jusqu'à une altitude d'environ 11 km on trouve la *troposphère* dont les caractéristiques sont données au tableau II.1. La température moyenne y est continûment décroissante avec un gradient de $-6,5^{\circ}\text{C}$ tous les 1000 mètres selon l'équation :

$$T(z) = 288 - 6,5 z \quad (T \text{ en K et } z \text{ en km}).$$

Cette équation caractérise l'*Atmosphère Standard* (AS) utilisée par les ingénieurs qui travaillent sur des projets faisant intervenir l'atmosphère, par exemple en aéronautique.

C'est dans la troposphère, qui représente les 5/6 de la masse de l'atmosphère, que l'on rencontre la plupart des phénomènes météorologiques. Ceci s'explique par le fait que, passé 10 000 m d'altitude, l'air est pratiquement sec, toute la vapeur d'eau s'étant condensée à cause de l'abaissement de température. Il n'y a donc quasiment plus de nuages.

Au-dessus de la troposphère se développe la *stratosphère* jusqu'à 50 km d'altitude environ. Dans cette zone, vers 20 km, se trouve une mince pellicule composée d'oxygène triatomique dont la propriété est d'arrêter les ultraviolets en provenance du soleil, tout du moins une partie de ceux-ci, à savoir les UV-C ($\lambda < 0,28 \mu\text{m}$), ceux-la même qui sont nocifs pour la vie. Cet oxygène triatomique O_3 , appelé *ozone*, se forme par transformation de l'oxygène diatomique en oxygène monoatomique puis, par recombinaison, en O_3 grâce à l'énergie apportée par le rayonnement ultraviolet ; la réaction de formation de l'ozone s'écrit :



altitude		pression	température	masse volumique	vitesse du son
m	ft	hPa	°C	kg/m ³	m/s
0	0	1 013	15,0	1,226	340
100	328	1 001	14,4	1,214	340
200	656	989	13,7	1,203	339
300	984	977	13,1	1,191	339
400	1 312	966	12,4	1,180	339
500	1 640	954	11,8	1,168	338
600	1 969	943	11,1	1,157	338
700	2 297	932	10,5	1,146	337
800	2 625	920	9,8	1,134	337
900	2 953	909	9,2	1,123	337
1 000	3 281	898	8,5	1,112	336
1 100	3 609	888	7,9	1,101	336
1 200	3 937	877	7,2	1,091	336
1 300	4 265	866	6,6	1,080	335
1 400	4 593	856	5,9	1,069	335
1 500	4 921	845	5,3	1,059	334
1 600	5 249	835	4,6	1,048	334
1 700	5 577	825	4,0	1,038	334
1 800	5 906	814	3,3	1,027	333
1 900	6 234	804	2,7	1,017	333
2 000	6 562	794	2,0	1,007	332
2 100	6 890	785	1,4	0,997	332
2 200	7 218	775	0,7	0,987	332
2 300	7 546	765	0,1	0,977	331
2 400	7 874	756	-0,6	0,967	331
2 500	8 202	746	-1,3	0,957	330
2 600	8 530	737	-1,9	0,948	330
2 700	8 858	728	-2,6	0,938	330
2 800	9 186	719	-3,2	0,928	329
2 900	9 514	710	-3,9	0,919	329
3 000	9 843	701	-4,5	0,909	328
3 100	10 171	692	-5,2	0,900	328
3 200	10 499	683	-5,8	0,891	328
3 300	10 827	674	-6,5	0,882	327
3 400	11 155	666	-7,1	0,873	327
3 500	11 483	657	-7,8	0,863	326
4 000	13 123	616	-11,0	0,819	324
4 500	14 764	577	-14,3	0,777	322
5 000	16 404	540	-17,5	0,736	320
5 500	18 045	504	-20,8	0,697	318
6 000	19 685	471	-24,0	0,660	316
6 500	21 325	440	-27,3	0,624	314
7 000	22 966	410	-30,5	0,589	312
7 500	24 606	382	-33,8	0,556	310
8 000	26 247	355	-37,0	0,525	308
8 500	27 887	330	-40,3	0,495	306
9 000	29 528	307	-43,5	0,466	304
9 500	31 168	285	-46,8	0,439	302
10 000	32 808	264	-50,0	0,412	299
10 500	34 449	244	-53,3	0,387	297
11 000	36 089	226	-56,5	0,364	295

Tableau II.1 - Propriétés de l'Atmosphère Standard

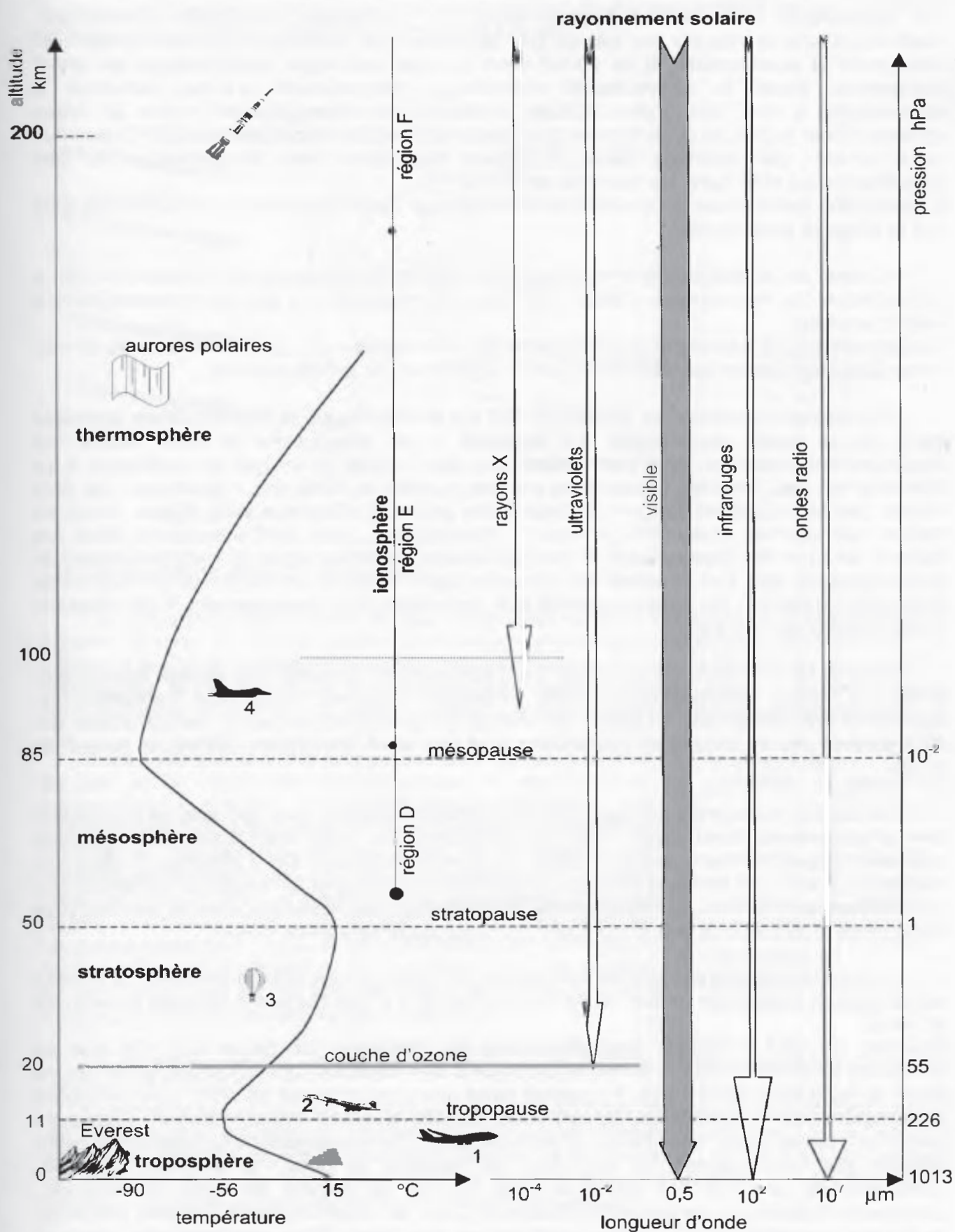


Figure II.1 - Structure et transmission de l'atmosphère (de 0 à 200 km)

1. avion de ligne (10 km), 2. supersonique Concorde (16 km), 3. ballon stratosphérique, 4. avion-fusée (X15 - 96 km)

On dénombre 1 molécule d'ozone pour 10^6 molécules d'oxygène diatomique. Malheureusement l'ozone est détruit par le chlore des molécules organochlorées qui atteignent la stratosphère. Il se forme alors un *trou* par lequel s'engouffrent les UV-C dangereux. Aussi la communauté scientifique internationale a-t-elle demandé la suppression à court terme des produits contenant du chlore pouvant migrer en haute altitude. C'est le cas de ceux formés de molécules de chlorofluorocarbone (CFC) que l'on peut trouver par exemple dans le liquide frigorigène des réfrigérateurs ou des climatiseurs ou bien dans les bombes aérosols.

L'absorption des UV par la couche d'ozone explique l'accroissement de température dont est le siège la stratosphère.

Au-delà de la stratosphère on trouve la *mésosphère* séparée de la première par la *stratopause*. La mésosphère s'élève à 85 km. La température y est décroissante jusqu'à -90°C environ.

On appelle *basse atmosphère* cette partie de l'atmosphère qui part du niveau de la mer jusqu'à la *mésopause* qui délimite la partie supérieure de la mésosphère.

À partir de la *mésopause* et jusqu'à 700 km se développe la *thermosphère* première zone de la haute atmosphère. La pression y est très basse et sous l'action du rayonnement solaire, et plus particulièrement des rayons X, les gaz ont tendance à se dissocier en gaz monoatomiques puis en ions positifs et électrons. Les atomes les plus lourds (azote, oxygène) tendent à disparaître au profit d'atomes plus légers. Ainsi on trouve des atomes d'oxygène, d'hélium, d'hydrogène... qui sont inexistant dans les basses couches de l'atmosphère. L'énergie solaire absorbée explique l'accroissement de la température que l'on constate en s'élevant dans la haute atmosphère. De plus cette absorption sélective du spectre solaire fait disparaître tout rayonnement X en dessous d'une altitude de 100 km.

Au-delà de 700 km, ce qui reste de l'atmosphère terrestre est appelé *exosphère*. C'est un milieu extrêmement raréfié, mélange d'atomes quasiment indépendants. Soumises principalement à l'action du champ de gravitation terrestre, les particules qui s'y meuvent ont un comportement balistique et décrivent des orbites elliptiques autour du globe.

On appelle *ionosphère* la zone de l'atmosphère terrestre dans laquelle se produisent des phénomènes électriques (tels les réflexions ou bien les absorptions d'ondes radioélectriques) ou bien lumineux (telles les aurores polaires). On y distingue 3 couches, notées D, E et F, en fonction du degré d'ionisation et des phénomènes qui s'y déroulent. L'ionisation des atomes de l'atmosphère étant due au rayonnement solaire, elle est plus importante le jour que la nuit ou lors des périodes de forte activité solaire.

La *magnétosphère* est la zone d'influence du champ magnétique terrestre. Ce champ est bipolaire ; il possède un axe Nord-Sud incliné de 11° par rapport à l'axe de rotation de la Terre.

Soumise au vent solaire la magnétosphère est déformée (cf. figure II.2). Ce flux de particules en provenance du soleil se propage à des vitesses supersoniques et se trouve freiné à l'approche de la Terre. Il apparaît alors une zone d'ondes de choc. Les particules contournent notre planète en suivant une surface appelée *magnétopause*. Quelques particules parviennent cependant à pénétrer dans la magnétosphère mais sont alors piégées par les *ceintures de Van Allen* au nombre de deux : la première ceinture, composée de protons, est située à 3000 km de la surface terrestre, la seconde, composée d'électrons, se trouve à 16000 km. Lors de fortes éruptions solaires certaines particules parviennent à percer les ceintures de Van Allen. Elles pénètrent alors dans la haute atmosphère où elles produisent les aurores magnétiques. Celles-ci sont observées plus particulièrement près des pôles là où les lignes de champ magnétique canalisent le

flux de particules électrisées. Les atomes d'oxygène et d'azote, excités par les particules cosmiques, se désexcitent en émettant de la lumière.

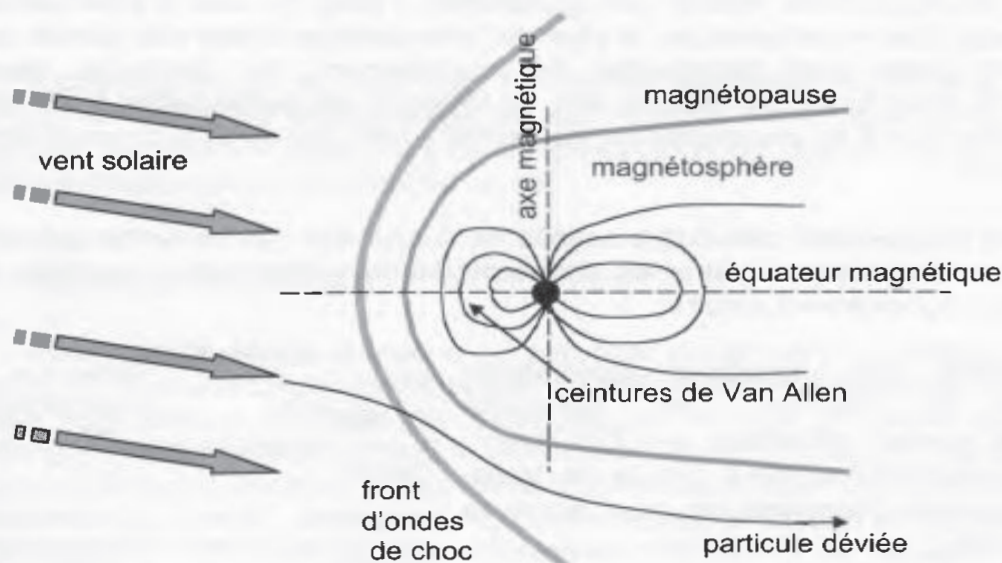


Figure II.2 - Effet du vent solaire sur la magnétosphère.

1.2 Composition de la troposphère

La troposphère est la zone la plus importante quant à l'atténuation du rayonnement solaire car c'est là que se situent les 5/6 de la masse atmosphérique. Pour étudier son influence sur le rayonnement solaire, il est nécessaire de bien connaître sa composition. Notons que la hauteur de la troposphère peut varier fortement selon la température de l'air considéré : 6 000 m pour de l'air polaire jusqu'à 15 000 m pour de l'air équatorial.

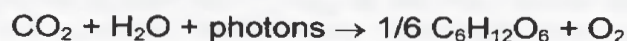
Dans tous les cas, l'air troposphérique est un mélange de gaz et de particules en suspension. Si on étudie la composition de l'air sec, on se rend compte que celle-ci est pratiquement constante dans toute la troposphère et même jusqu'à la mésopause compte tenu du brassage des masses atmosphériques. Cette composition est donnée dans le tableau II.2 en pourcentage en volume pour les quatre principaux gaz. Les autres constituants sont en proportions infimes ; dans l'ordre d'importance, on trouve : du néon Ne, de l'hélium He, du méthane CH₄, du krypton Kr, de l'hydrogène H₂, de l'oxyde nitreux N₂O, du monoxyde de carbone CO, du xénon Xe, de l'ozone O₃.

constituant de l'air sec	% en volume
azote	78,0836
oxygène	20,9475
argon	0,9340
gaz carbonique	0,0322

Tableau II.2 – Composition de l'air sec atmosphérique.

Le principal constituant est l'azote moléculaire N₂ très stable chimiquement ce qui explique son abondance.

L'oxygène est le second constituant de l'atmosphère mais le plus important pour la vie. Son origine est due au phénomène de photosynthèse directement lié à l'énergie solaire. La réaction globale ci-dessous résume ce phénomène : du dioxyde de carbone se combine avec de l'eau sous l'action du rayonnement solaire ; le résultat est la formation d'hydrates de carbone avec libération d'oxygène.



Mais l'atmosphère n'est pas constituée uniquement d'air sec. Un élément important est l'eau. La proportion d'eau dans l'air varie fortement suivant les climats et les saisons et n'est donc pas la même à la surface du globe terrestre. Cette eau peut être à l'état gazeux (la vapeur d'eau), à l'état liquide (les gouttelettes d'eau), ou bien à l'état solide (les cristaux de glace). Son importance sur le plan de l'énergétique solaire est grande car l'eau absorbe une partie non négligeable du rayonnement, en particulier dans l'infrarouge. De plus, sous forme de nuages, elle en réfléchit une autre partie. Mais son influence, directement liée à sa concentration, ne se fait sentir que dans la troposphère, là où elle est présente.

Hormis l'eau on trouve aussi des corps solides en suspension (poussières, cristaux salins) qui jouent un rôle important dans les phénomènes de condensation aqueuse et dans l'atténuation du rayonnement solaire.

On peut définir une *épaisseur équivalente* correspondant à la hauteur d'air considéré incompressible, de masse volumique $\rho = 1,226 \text{ kg/m}^3$, créant la pression standard $p = 1013 \text{ hPa}$ à sa base. Puisque ρ est supposée constante, on peut écrire la pression sous la forme :

$$p = \rho \cdot g \cdot z$$

soit :

$$z = 101300 / (1,226 \times 9,81) = 8423 \text{ m.}$$

On en déduit les épaisseurs équivalentes des différents gaz constituant l'air sec de l'atmosphère (cf. tableau II.3). Ainsi pour l'azote nous avons : $8423 \times 78,0836 \% = 6577 \text{ m.}$

gaz	épaisseur équivalente (en m)
azote	6 577
oxygène	1 764
argon	78,7
gaz carbonique	2,7
atmosphère	8 423

Tableau II.3 – Épaisseurs équivalentes de l'air sec atmosphérique.

* Application II.1

Calculons la masse de l'atmosphère qui entoure la Terre, assimilée à une sphère de 6400 km de rayon.

Utilisons les équations de l'Atmosphère Standard (valables pour $z < 11000 \text{ m}$) dont l'évolution de la température est donnée en fonction de l'altitude z par :

$$T = 288 - 6,5 \cdot 10^{-3} z \quad (1)$$

avec T en degrés kelvin et z en mètres.

L'équilibre d'un élément cylindrique d'air de hauteur dz donne l'équation de l'aérostatique :

$$dp + \rho g dz = 0 \quad (2)$$

où ρ est la masse volumique (en kg/m^3) de l'air à l'altitude z , p la pression (en pascals) et $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ la valeur du champ de gravitation terrestre.

En considérant l'air comme un gaz parfait, on peut écrire la loi d'état :

$$p = \rho r T \quad (3)$$

$r = 287 \text{ J/kg.K}$ étant la constante de l'air.

En combinant les équations (1) à (3) précédentes, et en choisissant au niveau de la mer ($z=0$) une pression $p_0 = 1013 \text{ hPa}$ et une masse volumique $\rho_0 = 1,226 \text{ kg/m}^3$, on arrive à l'expression ci-dessous :

$$\rho = 1,226 (1 - 2,257 \cdot 10^{-5} z)^{4,26}$$

La masse M_{atm} de l'atmosphère sera déterminée par l'intégrale suivante :

$$M_{\text{atm}} = \int_{R_T}^{\infty} 4 \pi r^2 \rho(r) dr = 4 \pi \int_{6,4 \cdot 10^6}^{6,4 \cdot 10^6 + 11000} 1,226 \left[1 - 2,257 \cdot 10^{-5} (r - 6,4 \cdot 10^6) \right]^{4,26} r^2 dr$$

$= 4,14 \cdot 10^{18} \text{ kg}$, ce qui est faible devant la masse de la Terre ($6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$).

La troposphère est une mince pellicule de gaz (11 km) entourant le globe terrestre (6400 km de rayon). Malgré sa faible épaisseur relative, son influence sur le rayonnement solaire atteignant le sol terrestre ne peut être ignorée.

2. INFLUENCE DE L'ATMOSPHÈRE SUR LE RAYONNEMENT SOLAIRE

L'atténuation du rayonnement solaire est complexe et de plus aléatoire puisque directement lié à la météorologie du lieu d'étude. Néanmoins on a cherché à définir certains paramètres utiles dans la compréhension du phénomène et pouvant permettre une estimation de l'énergie reçue au sol.

2.1 Masse atmosphérique

Plus grande est la longueur du parcours de la lumière solaire dans l'atmosphère terrestre, plus grande est l'atténuation de celle-ci avant d'atteindre un éventuel capteur. Pour tenir compte du trajet parcouru par les photons, on utilise la notion de *masse atmosphérique*. Celle-ci est égale au rapport, noté m^* , de la distance parcourue dans l'atmosphère par un rayon en provenance du soleil à l'épaisseur verticale de l'atmosphère mesurée au niveau de la mer. En considérant la figure de gauche ci-dessous, où l'atmosphère est une couche d'épaisseur constante et parallèle au sol supposé horizontal, on a :

$$m^* = \frac{1}{\sin h}$$



Figure II.3

Influence de la courbure du globe terrestre sur le trajet parcouru par les rayons solaires.

Pour le soleil au zénith ($h=90^\circ$), $m^*=1$ (AM1=Air Mass One en anglais) et pour le soleil vu sous un angle $h=30^\circ$, $m^*=2$ (AM2).

Le cas $m^*=0$ correspond à l'étude du rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère terrestre (référence AM0).

En réalité, la courbure de la Terre implique un trajet plus long.

De plus la densité variable de l'atmosphère entraîne une courbure des rayons lumineux ce qui rallonge un peu plus le trajet parcouru par la lumière (cf. la figure de droite, ci-dessus).

Enfin, lorsqu'un récepteur est placé en altitude par rapport au niveau de la mer ($z_0=0$, $p_0=1013$ hPa), le trajet des rayons lumineux est raccourci.

Pour tenir compte de ces trois phénomènes, on utilise la formule suivante qui donne la masse atmosphérique *réelle* m que l'on distingue de la masse atmosphérique *théorique* m^* :

$$m = \left\{ \left[1229 + (614 \sin h)^2 \right]^{1/2} - 614 \sin h \right\} \frac{p}{1013}$$

* Application II.2

Comparons les valeurs théorique m^* et réelle m de la masse atmosphérique. Pour cela, déterminons la hauteur h du soleil pour laquelle l'erreur commise en utilisant la formule théorique de la masse atmosphérique entraîne une erreur relative de 1 %.

Faisons ce calcul pour une pression $p=1013$ hPa. Il faut donc résoudre en h l'équation

suivante : $\frac{m^* - m}{m} = 0,01$

où $m^* = \frac{1}{\sin h}$ et $m = \left\{ \left[1229 + (614 \sin h)^2 \right]^{1/2} - 614 \sin h \right\} \frac{p}{1013}$

La résolution numérique de l'équation donne : $h \approx 16^\circ$.

Le tableau ci-dessous donne la valeur de m^* et m pour différentes valeurs de la hauteur h du soleil, dans le cas d'un point situé au niveau de la mer ($p=1013$ hPa). On voit que l'approximation de la masse atmosphérique réelle m par la masse atmosphérique théorique m^* est suffisante dans la plupart des cas, c'est-à-dire lorsque la lumière solaire n'est pas rasante.

h (°)	90	35	20	15	10	5
m^*	1	1,743	2,924	3,864	5,759	11,474
m	1	1,741	2,906	3,821	5,616	10,461
erreur relative (%)	0	0,1	0,6	1,1	2,5	9,7

Tableau II.4 – Comparaison des masses atmosphériques théorique m^* et réelle m .

2.2 Atténuation du rayonnement solaire

Deux phénomènes atténuent le rayonnement solaire traversant l'atmosphère terrestre. Il s'agit de l'absorption et de la diffusion.

L'absorption est sélective et dépend principalement de 4 éléments :

- l'ozone qui forme un écran qui arrête les UV ($\lambda < 0,28 \mu\text{m}$) nocifs pour la vie,
- l'oxygène qui absorbe des bandes étroites du spectre visible (vers $0,69$ et $0,76 \mu\text{m}$),
- le gaz carbonique qui absorbe une partie de l'IR lointain ($\lambda > 2 \mu\text{m}$),
- la vapeur d'eau qui entraîne des bandes d'absorption multiples surtout dans l'IR. On ne la rencontre pratiquement qu'au niveau du sol ($z < 5 \text{ km}$).

* Application II.3

Cherchons à définir le coefficient d'absorption solaire α_w^* due à la vapeur d'eau.

On définit la hauteur d'eau condensable w comme étant égale à l'épaisseur d'eau liquide que l'on recueillerait si toute la vapeur d'eau à la verticale du lieu était condensée. Elle peut être calculée en mètres par la formule empirique suivante :

$$w = 1,7 \cdot 10^{-5} p_{vs} \varphi$$

où p_{vs} , en pascals, est la pression de vapeur d'eau saturante à la température T (°C). Celle-ci peut être calculée par la formule suivante :

$$p_{vs} = 611 \exp \left(\frac{T}{0,059 T + 13,706} \right).$$

On peut aussi se référer à la table de la vapeur d'eau saturée, donnée en annexe.

La quantité ϕ , appelée humidité relative, est égale au rapport de la pression partielle de vapeur d'eau sur la pression de vapeur saturante p_{vs} .

Une autre formule empirique permet d'avoir une idée de la fraction du rayonnement solaire α_w^* qui est absorbée par l'humidité de l'air :

$$\alpha_w^* = 0,3 (m \cdot w)^{0,3}$$

où m est la masse atmosphérique et w la hauteur d'eau condensable (en m). Pour de l'air ambiant à 15°C avec une humidité relative de 55 %, le soleil se trouvant à une hauteur $h=55^\circ$ sur l'horizon, on trouve :

$m = 1/\sin h = 1,22$, $p_{vs}=1708$ Pa , $w=16$ mm et $\alpha_w^* = 9$ %.

La *diffusion* se produit avec les molécules de l'air, celles de la vapeur d'eau et les particules en suspension. Elle est d'autant plus importante que la longueur d'onde λ du rayonnement est petite (loi de Rayleigh en λ^{-4}) et que l'air est humide et pollué. Ce phénomène explique pourquoi le ciel est bleu dans la journée et rouge-orangé le matin et le soir lorsque le soleil est bas sur l'horizon. En effet, considérons le soleil à midi ; le trajet des rayons lumineux est relativement court. Compte tenu de la loi de Rayleigh, le rayonnement de courte longueur d'onde est plus diffusé par les molécules de l'atmosphère que le rayonnement de grande longueur d'onde; il s'en suit que la lumière bleue ($\lambda=0,47 \mu\text{m}$) est plus diffusée que la lumière rouge ($\lambda=0,67 \mu\text{m}$) et le ciel nous paraît bleu. À l'aurore ou au crépuscule, la même loi s'applique ; mais comme le trajet de la lumière est beaucoup plus long, les longueurs d'onde bleues sont diffusées mais aussi absorbées et il ne reste, fortement atténuées, que les grandes longueurs d'onde. La rétine de l'observateur qui fixe le soleil enregistre alors un disque rougeoyant.

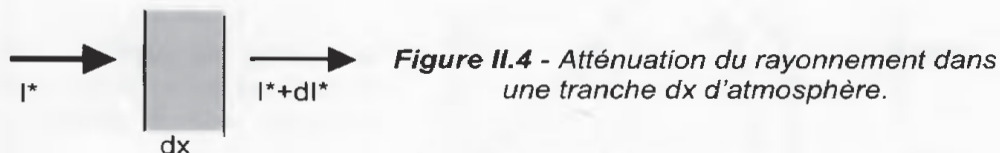
Soit $I^*(\lambda)$ l'éclairement solaire monochromatique. Cette quantité correspond à l'émittance énergétique monochromatique E_λ (en $\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$) vue dans l'étude du spectre solaire hors atmosphère. La différence d'écriture tient au fait que I^* correspond à une grandeur mesurée au niveau du sol terrestre. La valeur mesurée hors atmosphère sera écrite I_0^* et dans ce cas $I_0^*(\lambda) = E_\lambda$.

L'éclairement solaire subit une atténuation fonction de sa longueur d'onde mais aussi de la longueur de son parcours dans l'atmosphère. Comme dans le cas de nombreux phénomènes naturels, on peut considérer que, à la distance x de pénétration dans l'atmosphère, l'atténuation $dI^*(\lambda)$ est proportionnelle à l'éclairement $I^*(\lambda)$ et à la longueur élémentaire dx parcourue en cet endroit par les rayons lumineux.

On a donc :

$$dI^*(\lambda) = - A(\lambda) \cdot I^*(\lambda) dx$$

où $A(\lambda)$ est le facteur de proportionnalité, a priori fonction de la longueur d'onde λ .



Le signe moins vient de ce que nous avons affaire à une diminution de l'éclairement à la traversée de la tranche d'atmosphère d'épaisseur dx .

On intègre de $x=0$ à $x=L$ où L représente le trajet total parcouru dans l'atmosphère. On obtient :

$$I^*(\lambda) = I_0^*(\lambda) e^{-A(\lambda) \cdot L}$$

Posons $K(\lambda) = A(\lambda) \cdot H$ où H est l'épaisseur verticale supposée constante de l'atmosphère. Par définition de la masse atmosphérique, $m = L/H$ et par suite,

$$I^*(\lambda) = I_0^*(\lambda) e^{-K(\lambda) \cdot m}$$

Dans cette expression, $K(\lambda)$ est appelé coefficient d'atténuation monochromatique. C'est une grandeur adimensionnelle, fonction des différents paramètres énoncés ci-dessus (absorption, humidité, particules en suspension...).

On appelle coefficient de transmission monochromatique $\tau(\lambda)$ de l'atmosphère le rapport $I^*(\lambda)/I_0^*(\lambda)$. D'où son expression :

$$\tau(\lambda) = e^{-K(\lambda) \cdot m}$$

Par ciel clair et pur, le coefficient de transmission global de l'atmosphère peut être calculé par la formule empirique suivante :

$$\tau_{\text{atm}} = 0,5 (e^{-0,65 m} + e^{-0,095 m})$$

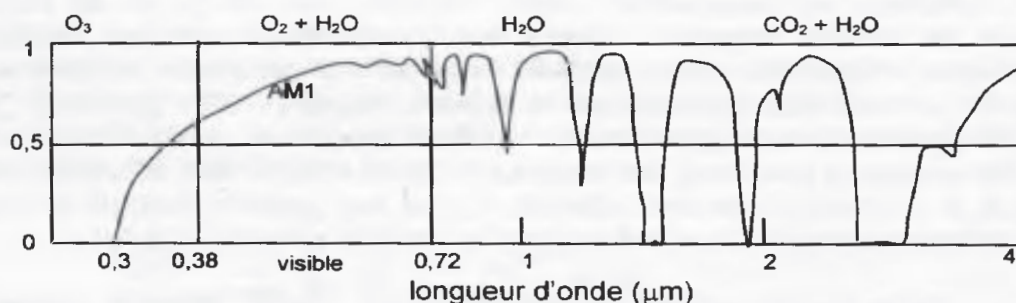


Figure II.5 – Transmission globale de l'atmosphère avec indication des gaz à l'origine de l'absorption pour AM1.

La figure ci-dessous montre l'influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire reçu au niveau de la mer, par ciel clair et pur, la hauteur du soleil étant de 30° (AM2).

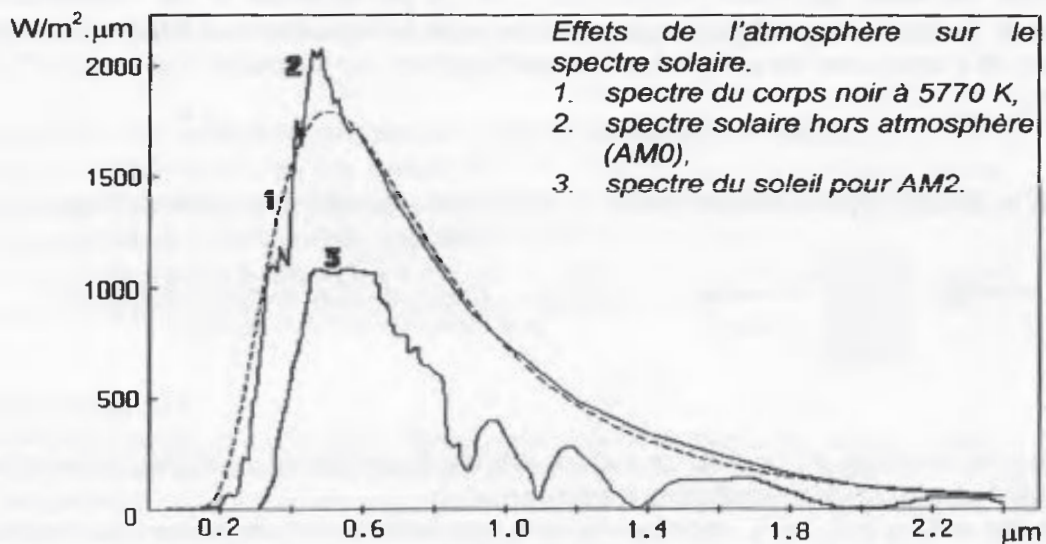


Figure II.6

On y retrouve les différentes bandes d'absorption déjà citées. Pour $\lambda < 0,28 \mu\text{m}$, l'absorption du rayonnement est due à l'ozone. Dans l'infrarouge on constate plusieurs bandes d'absorption dues à la vapeur d'eau.

* Application II.4

Un capteur plan est installé en un lieu situé à 1500 m d'altitude. Le soleil fait un angle de 37° par rapport à l'horizon. Le ciel est clair. En orientant le capteur perpendiculairement au rayonnement solaire, quel est la puissance reçue ?

La pression à 1500 m vaut 845 hPa (cf. tableau II.1).

La masse atmosphérique a pour valeur :

$$m = \left\{ \left[1229 + (614 \sin 37) \right]^2 - 614 \sin 37 \right\}^{1/2} \frac{845}{1013} = 1,38$$

On en déduit le facteur global de transmission de l'atmosphère :

$$\tau_{\text{atm}} = 0,5 (e^{-0,65 \times 1,38} + e^{-0,095 \times 1,38}) = 0,64.$$

La puissance solaire reçue s'élève alors à : $\tau_{\text{atm}} \cdot C^* = 0,64 \times 1353 = 868 \text{ W/m}^2$.

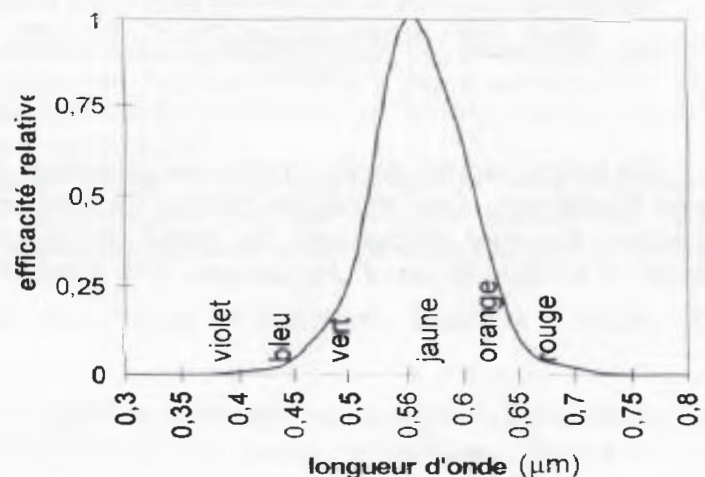
2.3 La lumière solaire

Une particularité de l'œil humain est sa sensibilité au rayonnement solaire. Grâce à cette sensibilité, la rétine envoie au cerveau une information qui nous permet d'avoir une image du monde qui nous entoure. Signalons toutefois que cette image n'est pas universelle et que d'autres êtres vivants peuvent avoir une sensibilité différente. La plupart des mammifères, par exemple, ne voient pas en couleur. Leur rétine ne comporte pratiquement que des bâtonnets (cellules extrêmement sensibles aux photons) alors que les cônes (photorécepteurs responsables de la vision colorée) sont pratiquement inexistantes. Les abeilles quant à elles peuvent s'orienter grâce à la polarisation de la lumière et "voient" dans l'ultraviolet.

On appelle *photométrie* la discipline qui s'intéresse à la mesure du *rayonnement lumineux*. Par lumineux on entend ici la partie du spectre visible pour l'œil humain que l'on appelle plus couramment *lumière solaire* ou *lumière blanche* ou *lumière naturelle*.

Le récepteur de cette lumière est la rétine qui possède une sensibilité fonction de la longueur d'onde du rayonnement qu'elle reçoit. Ainsi les IR et les UV du spectre solaire sont *invisibles* à l'œil *standard* et dans le visible $[0,38 \text{ à } 0,72 \mu\text{m}]$ cette sensibilité est très variable. Les photorécepteurs de la rétine (cônes et bâtonnets) envoient au cerveau un signal qui est fonction du nombre de photons reçus mais qui dépend aussi de la longueur d'onde qui leur est associée.

Figure II.7 - Efficacité lumineuse relative de l'œil humain en fonction de la longueur d'onde, dans le cas de la vision diurne.



De nombreuses mesures ont montré que l'œil humain était le plus sensible à la lumière vert-jaune ($\lambda = 0,555 \mu\text{m}$). Si on donne la valeur 1 à la sensibilité de l'œil pour

cette longueur d'onde de $0,555 \mu\text{m}$, on peut définir l'efficacité relative, notée β_λ , comme le rapport de la sensibilité de l'œil pour une longueur d'onde λ à la sensibilité de l'œil pour le vert-jaune.

La figure II.7 donne cette efficacité relative dans le cas de la vision diurne (ou photopique). Notons qu'en vision nocturne (ou scotopique) la sensibilité de l'œil est un peu différente : le maximum de la courbe est décalé vers $0,51 \mu\text{m}$ correspondant à un bleu-vert.

* Application II.5

Cherchons à déterminer l'efficacité lumineuse relative de la lumière solaire c'est-à-dire la fraction du spectre solaire utile pour l'éclairage. Pour cela il faut considérer l'éclairement solaire monochromatique $I^*(\lambda)$ au niveau du sol et l'affecter de son efficacité relative β_λ . On obtient alors l'efficacité relative ε_r par intégration :

$$\varepsilon_r = \frac{\int_0^\infty \beta_\lambda I^*(\lambda) d\lambda}{C^* \cdot \tau_{\text{atm}}}$$

où le produit $C^* \cdot \tau_{\text{atm}}$ représente l'éclairement solaire global au niveau du sol avec C^* constante solaire et τ_{atm} coefficient de transmission global de l'atmosphère :

$$C^* \cdot \tau_{\text{atm}} = \int_0^\infty I^*(\lambda) d\lambda$$

D'autre part, $I^*(\lambda) = \tau_{\text{atm}}(\lambda) \cdot E_\lambda$ où $\tau_{\text{atm}}(\lambda)$ correspond au facteur de transmission de l'atmosphère pour la longueur d'onde λ .

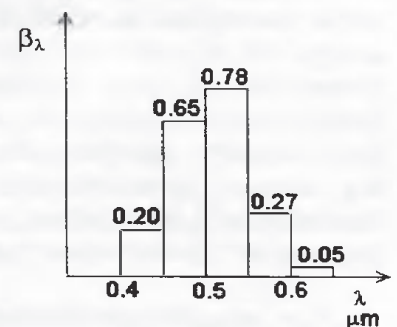
Pour simplifier l'intégration, on peut supposer, en première approximation, que ce facteur de transmission monochromatique est indépendant de la longueur d'onde et égal au facteur global de transmission : $\tau_{\text{atm}}(\lambda) = \tau_{\text{atm}}$.

$$\text{Il vient : } \varepsilon_r = \frac{\int_0^\infty \beta_\lambda E_\lambda d\lambda}{C^*}$$

Au premier chapitre, nous avons calculé la puissance émise par le soleil dans le visible ; à savoir 566 W/m^2 . On peut alors définir une émittance énergétique monochromatique moyenne $E_\lambda = 566 / (0,72 - 0,38) = 1665 \text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$.

En assimilant la courbe continue donnant l'efficacité relative β_λ au diagramme en échelons représenté ci-contre et en prenant pour E_λ la valeur moyenne trouvée plus haut, on obtient :

$$K = \frac{1665 \cdot 0,05 \cdot (0,20 + 0,65 + 0,78 + 0,27 + 0,05)}{1353} = 12 \%$$



Ce calcul rapide donne l'ordre de grandeur de la partie utile du rayonnement solaire pour l'éclairage. Des mesures réelles fournissent la valeur de 15 %. Notons que, pour d'autres sources d'éclairage, la partie du rayonnement utile est souvent encore plus faible : 1% dans le cas d'une bougie, 2 % dans le cas d'une lampe à incandescence.



3. LES ÉCHANGES D'ÉNERGIE

3.1 Notion d'albédo

On a vu, à l'application I.3, que le Soleil émet une puissance considérable, de l'ordre de $3,8 \cdot 10^{26}$ W. Compte tenu de la distance Soleil-Terre élevée et de la petitesse de notre planète, ce n'est qu'une infime partie de cette énergie qui est reçue par la Terre et son atmosphère. Néanmoins la quantité absorbée est suffisante pour maintenir la Vie telle que nous la connaissons.

* Application II.6

Déterminons l'énergie solaire reçue par le système Terre-atmosphère.

En prenant pour le rayon terrestre la valeur de 6400 km et pour la constante solaire 1353 W/m², cette puissance est égale à :

$$\pi (6,4 \cdot 10^6)^2 \times 1353 = 1,74 \cdot 10^{17} \text{ W}$$

soit moins de 0,5 milliardième de celle émise par le Soleil.

Néanmoins cette puissance représente sur une année une énergie de :

$$1,74 \cdot 10^{17} \times 24 \times 365/1000 = 1,52 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$$

soit plus de 15 000 fois la consommation énergétique totale de la planète, qui s'élève à 10^{14} kWh/an environ.

Une partie de cette énergie reçue par notre planète est réfléchie vers l'espace principalement par l'atmosphère mais aussi par le sol terrestre. Dans le bilan global des échanges d'énergie, on ne doit tenir compte que de la fraction de l'énergie solaire incidente qui est réellement absorbée par le système Terre-atmosphère.

C'est parce que la Terre et particulièrement les nuages réfléchissent une partie du rayonnement solaire que l'on peut les apercevoir d'un véhicule spatial. En effet, le système Terre-atmosphère n'est pas en lui-même lumineux. Sa température le fait rayonner dans l'infrarouge, plage de longueurs d'onde à laquelle notre rétine est insensible. Si ce système se comportait comme un corps noir pour les courtes longueurs d'onde en provenance du Soleil (c'est-à-dire s'il absorbait tout le rayonnement incident), il serait invisible puisque aucune lumière ne serait réfléchie.

Pour caractériser l'importance du phénomène de réflexion du rayonnement incident par une surface on définit une quantité appelée *albédo*. L'albédo d'une surface est égal au rapport de l'énergie réfléchie sur l'énergie totale reçue par la surface sous forme de rayonnement. C'est l'équivalent du facteur de réflexion.

Le tableau II.5 donne la valeur de l'albédo solaire a^* pour quelques surfaces naturelles. L'albédo solaire de la lune apparaît très faible et pourtant, par ciel clair, la nuit, lors de la pleine lune, il est aisé de se déplacer à la simple lumière du soleil réfléchi par la surface lunaire.

L'eau possède un albédo variable en fonction de sa température. Quant à la neige, son albédo diminue avec le damage.

Par albédo solaire a^* on entend l'albédo relatif à la bande du spectre solaire. Pour une même surface, l'albédo, noté a , correspondant à la bande infrarouge, peut être très différent de l'albédo dans le visible¹.

¹ En toute rigueur l'albédo d'une surface dépend de la longueur d'onde et de la direction du rayonnement incident ainsi que de la température et, bien sûr, de la nature de la surface.

surface	albédo solaire a^*
mer chaude	0,05
Lune	0,07
forêt tropicale	0,12
mer froide	0,15
pierre, ciment, sol cultivé	0,15 à 0,25
herbe verte	0,25
sable clair	0,37
neige tassée	0,60
Vénus	0,64
neige fraîche	0,85
nuage	0,80

Tableau II.5 – Albédo solaire de différentes surfaces.

Dans les calculs d'un avant-projet, on peut choisir un albédo solaire moyen égal à 0,3 pour le sol terrestre. Il faut noter qu'une partie du rayonnement solaire réfléchi par le sol peut lui revenir dans le cas d'une couverture nuageuse importante; il s'ensuit un phénomène de multiples réflexions qui a pour conséquence de fournir un albédo effectif plus faible (cf. figure II.8).

Figure II.8 - Phénomène des multiples réflexions du rayonnement solaire sur la couche nuageuse



3.2 Bilan énergétique annuel global du système Terre-atmosphère

L'énergie annuelle reçue par le système Terre-atmosphère en provenance du Soleil s'élève à $1,52 \cdot 10^{18}$ kWh (cf. application II.6). On peut en déduire aisément l'énergie annuelle reçue, en moyenne, chaque année, par un mètre carré de surface du système Terre-atmosphère :

$$\frac{1,52 \cdot 10^{18}}{4 \pi (6400 \cdot 10^3)^2} = 2953 \text{ kWh/m}^2$$

ou encore :

$$\frac{2953 \times 3600}{10^4} = 1063 \text{ kJ/cm}^2$$

valeur que l'on arrondit habituellement à $1100 \text{ kJ/cm}^2 \cdot \text{an}$.

On en tire l'énergie reçue chaque jour en moyenne par 1 cm^2 de surface de la planète :

$$\frac{1063}{365} = 2,9 \text{ kJ/cm}^2 \cdot \text{j}$$

Ces valeurs ne sont bien sûr que des grandeurs moyennées sur l'année et la surface de notre planète. Elles ne tiennent compte ni de la situation géographique de la surface réceptrice, ni de la période de l'année.

Néanmoins en partant de cette base, on peut construire le schéma de la figure II.9 qui indique le devenir de ces 1100 kJ tombant sur 1 cm² de surface du système Terre-atmosphère. On y constate qu'une partie, soit 298 kJ, est réfléchi par l'atmosphère, principalement à cause de la couverture nuageuse, tandis que 46 kJ sont réfléchis directement par la surface de notre planète (terres et océans) et vont se perdre dans l'espace. Au total, 344 kJ/cm².an, soit 31 % du rayonnement électromagnétique de courte longueur d'onde en provenance du Soleil, sont renvoyés vers l'espace, ce qui peut se traduire par un albédo solaire de notre planète égal à 0,31.

Le système Terre-atmosphère absorbe donc 69 % de l'énergie solaire incidente, ce qui correspond à 756 kJ/cm².an. Sur ces 756 kJ, 216 kJ sont absorbés dans l'atmosphère et plus particulièrement la troposphère, le solde, soit 540 kJ, sert à réchauffer les océans et le sol des continents.

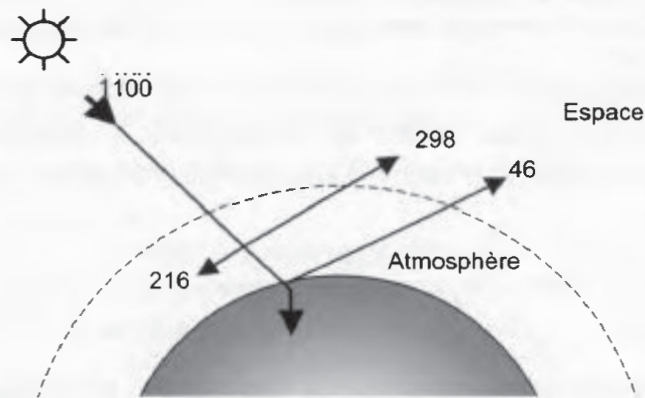


Figure II.9

Répartition du rayonnement solaire incident sur le système Terre-atmosphère, soit 1100 kJ/cm².an en moyenne.

756 kJ de rayonnement de courte longueur d'onde ($\lambda < 4 \mu\text{m}$) sont effectivement absorbés chaque année par cm² du système Terre-atmosphère.

Le bilan devant être équilibré, le système Terre-atmosphère doit évacuer vers l'espace autant d'énergie qu'il en absorbe, c'est-à-dire 756 kJ/cm² sous forme de rayonnement infrarouge ($\lambda > 4 \mu\text{m}$) (cf. fig.II.10). Globalement, l'atmosphère émet 1669 kJ sous forme de rayonnement infrarouge dont 627 sont perdus dans l'Espace.

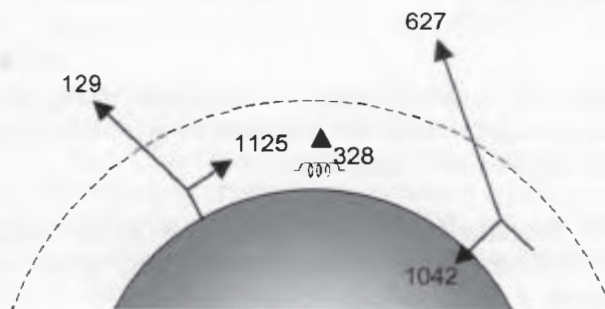


Figure II.10

Répartition des échanges d'énergie entre la Terre, l'Atmosphère et l'Espace.

Chaque cm² du système Terre-atmosphère rayonne chaque année 756 kJ vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge ($\lambda > 4 \mu\text{m}$).

Le sol terrestre rayonne lui aussi dans l'infrarouge. L'énergie annuelle se monte à environ 1254 kJ/cm^2 dont 90 % (soit 1125 kJ) sont absorbés par l'atmosphère, le solde, soit 10 % (129 kJ) étant perdu vers l'espace à cause de l'existence d'une fenêtre de transparence de l'atmosphère qui n'est pas totalement opaque à l'infrarouge (cf. application II.7).

* Application II.7

L'atmosphère absorbe une grande partie du rayonnement infrarouge émis par la Terre mais on a vu qu'il existe une fenêtre de transparence par laquelle une partie de ce rayonnement s'échappe vers l'espace.

Cette fenêtre a environ $4 \mu\text{m}$ de large et se trouve centrée sur la longueur d'onde du maximum d'émission.

Déterminons l'énergie perdue en considérant la Terre comme un corps noir à la température $T=15^\circ\text{C}$. Pour cela utilisons la table du corps noir donnée en Annexe.

Commençons par définir la longueur d'onde λ_m correspondant au maximum d'énergie rayonnée.

$$\text{On obtient : } \lambda_m = \frac{2898}{(273 + 15)} = 10 \mu\text{m}.$$

En considérant que dans cette fenêtre de transparence le coefficient de transmission monochromatique τ_λ est constant et égal à 80 %, on peut tracer la figure ci-dessous.

Dans notre cas :

- pour $\lambda=8 \mu\text{m}$ on a : $x = \frac{\lambda}{\lambda_m} = \frac{8}{10} = 0,8$ et par suite $z = 12,39 \%$.
- pour $\lambda = 12 \mu\text{m}$ on a : $x = \frac{\lambda}{\lambda_m} = \frac{12}{10} = 1,2$ et par suite $z = 37,84 \%$.

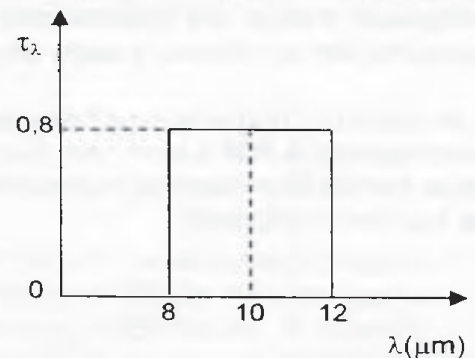
La fraction d'énergie infrarouge rayonnée par la Terre dans la bande spectrale $[8-12] \mu\text{m}$ est égale à :

$$37,84 - 12,39 = 25,45 \%$$

et la fraction qui s'échappe vers l'espace est égale à :

$$\tau_\lambda \times 25,45 = 0,8 \times 25,45 = 20,4 \%$$

Ce résultat est un égal au double de la valeur indiquée plus haut (soit 10 %). Cette différence s'explique par le fait que la *fenêtre de transparence* n'est pas rigoureusement rectangulaire, que la Terre n'est pas un *vrai* corps noir et surtout qu'on n'a pas tenu compte dans ce calcul de la couverture nuageuse qui *ferme* partiellement cette fenêtre. Si on fait l'hypothèse que notre planète est en moyenne recouverte par moitié de nuages qui empêchent le rayonnement infrarouge provenant du sol de se perdre dans l'espace, on retrouve alors le résultat précédent, à savoir 10 %.



Globalement, le système Terre-atmosphère se comporte donc comme une immense machine thermodynamique qui transforme en grandes longueurs d'onde le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde qu'il absorbe.

Vue de l'espace notre planète peut être assimilée à un corps noir ayant une température moyenne de -20°C environ (cf. application II.8), tandis que le sol terrestre peut être pris égal en moyenne à 15°C (cf. application II.9)

*** Application II.8**

Pour mener à bien des calculs d'échanges radiatifs entre un satellite et notre planète, il est intéressant de disposer d'une température globale du système constitué de la Terre et de son atmosphère, la surface de ce système étant supposée isotherme à la température T .

Considérons ce système comme un corps noir pour la bande infrarouge.

L'espace quant à lui est un corps noir à la température $T_e = 3 \text{ K}$.

L'équation de bilan d'énergie s'écrit :

$$\alpha^* \cdot C^* \cdot \pi R^2 = \sigma (T^4 - T_e^4) 4 \pi R^2$$

Le membre de gauche correspond à l'énergie reçue et absorbée en provenance du soleil tandis que le membre de droite représente l'échange radiatif entre notre planète et l'espace.

Le coefficient d'absorption solaire α^* est égal au complément à 1 de l'albédo solaire $a^* = 0,31$.

On obtient :

$$T = \left[T_e^4 + \frac{(1 - a^*) C^*}{4 \sigma} \right]^{0.25} = \left[3^4 + \frac{(1 - 0,31) 1353}{4 \times 5,67 \cdot 10^{-8}} \right]^{0.25} = 253 \text{ K} = -20^\circ \text{C}$$

Remarquons la faible valeur de la température T_e qui peut être omise dans le calcul.

*** Application II.9**

Déterminons à présent la température moyenne T_T du sol terrestre, considéré comme une surface noire.

Utilisons pour cela les échanges énergétiques annuels moyens donnés à la figure II.10. On y lit que le sol émet annuellement une énergie égale à $1125 + 129$ soit 1254 kJ/cm^2 ou encore $1254 \cdot 10^7 \text{ J/m}^2$.

Cette quantité correspond à une puissance radiative supposée constante de :

$$\frac{1254 \cdot 10^7}{365 \times 24 \times 3600} = 397,6 \text{ W/m}^2$$

En faisant l'hypothèse d'une émission homogène de la surface du globe terrestre isotherme à T_T , on peut écrire :

$$\sigma T_T^4 = 397,6$$

soit :

$$T_T = \left(\frac{397,6}{5,67 \cdot 10^{-8}} \right)^{0.25} = 289 \text{ K} = 16^\circ \text{C}$$

La température moyenne généralement admise est de 15°C .

3.3 Échanges d'énergie entre la Terre et l'Atmosphère

Si le bilan énergétique global annuel de notre planète est équilibré ($2,9 \text{ kJ/cm}^2 \cdot \text{jour}$), la répartition spatiale et temporelle du bilan radiatif est loin d'être homogène. En tout point de la planète coexistent un apport solaire et une perte par rayonnement infrarouge. On constate que certaines régions sont excédentaires tandis que d'autres sont déficitaires en énergie.

Les causes de ce déséquilibre sont multiples :

- la sphéricité de la Terre, jointe à l'inclinaison de son axe de rotation et à sa trajectoire elliptique autour du Soleil, entraîne une variation spatiale et temporelle du flux solaire absorbé. Celui-ci dépend donc de la latitude et de la saison considérées. Seul l'équateur reçoit un ensoleillement pratiquement constant au cours d'une année, ce qui n'est pas le cas des autres régions.
- sur une journée, l'équilibre temporel ne peut être réalisé à cause du cycle jour-nuit. La partie non ensoleillée continue de rayonner dans l'infrarouge une énergie qui est partiellement perdue dans l'espace. Elle a donc tendance à se refroidir.

- l'albédo de la planète dépend fortement de la couverture nuageuse. Or celle-ci n'est pas uniforme. Les régions tropicales sans nuage subissent un ensoleillement important mais en contrepartie perdent beaucoup d'énergie sous forme de rayonnement infrarouge. La zone intertropicale, centrée sur l'équateur, est, quant à elle, souvent nuageuse. Les pertes par rayonnement infrarouge y sont alors limitées. Le rayonnement solaire est en partie réfléchi compte tenu de l'albédo solaire élevé de cette région. Néanmoins, le bilan énergétique y est globalement positif. C'est une région excédentaire en énergie.

Les figures II.11 et II.12 donnent un aperçu de la répartition hétérogène du bilan radiatif (apport solaire moins les pertes par rayonnement infrarouge) de notre planète durant les mois de janvier et juillet.

On y constate que la distribution énergétique dépend fortement de la saison et de la latitude considérées : durant l'hiver boréal (mois de janvier par exemple), l'hémisphère nord est globalement déficitaire tandis que l'hémisphère sud est excédentaire. Cette répartition géographique saisonnière du bilan radiatif s'inverse en été.

Les lignes de même énergie suivent d'assez près les parallèles. Les déviations constatées se produisent principalement sur les continents où l'albédo du sol et la couverture nuageuse varient plus fortement que sur les océans.

Au delà du 35^{ème} parallèle, le bilan annuel est globalement négatif bien qu'il puisse être momentanément positif durant l'été boréal.

Les gains énergétiques les plus élevés sont relevés durant l'été pour les régions désertiques : Afrique du nord, Arabie, Australie.

Il est à noter cependant deux particularités :

- des gradients importants existent l'été entre les zones océaniques et continentales. Ces variations sont dues à la différence de réchauffement entre l'eau et le sol terrestre.
- la zone équatoriale est très souvent nuageuse ce qui modifie l'albédo. La fraction du rayonnement solaire réfléchi par la couverture nuageuse augmente, ce qui peut entraîner localement un bilan radiatif négatif. C'est ce que l'on peut constater au mois de juillet au dessus du golfe du Bengale et du golfe de Guinée.

Les déséquilibres spatio-temporels du bilan radiatif entraînent de grands mouvements des masses fluides que sont l'atmosphère et les océans. Ces mouvements permettent des échanges d'énergie internes au système Terre-atmosphère.

Ces échanges d'énergie se font principalement par convection et par évaporation. Globalement l'énergie transférée s'élève en moyenne à 328 kJ/cm².an.

Les transferts d'énergie par convection ont lieu de la surface terrestre vers l'atmosphère. Ils se produisent dès qu'un gradient thermique apparaît. En général celui-ci est dû à l'échauffement du sol par le rayonnement solaire. Un écart de température se crée alors entre l'air des basses couches près du sol et les hautes couches plus froides. Un mouvement convectif vertical apparaît, transportant ainsi de l'énergie du sol vers l'atmosphère.

Quant aux transferts d'énergie par évaporation de l'eau, ils proviennent du fait qu'un air non saturé en humidité peut absorber une certaine quantité d'eau. Le rayonnement solaire incident entraîne l'évaporation de l'eau de surface (océans, lacs,...). Une grande quantité d'énergie est alors stockée sous forme de chaleur latente, transportée par les vents puis libérée lors de condensations pouvant se produire à des milliers de kilomètres de l'endroit où s'est produite l'évaporation. C'est ce que l'on nomme le *cycle de l'eau*. La planète étant recouverte à 70 % par les océans, ce phénomène est très important dans le bilan énergétique entre la Terre et son atmosphère.

Les grands courants aériens qui permettent certains transferts d'énergie d'une zone à une autre dépendent fortement de la saison. Dans le cas de l'hiver boréal, par exemple, les océans se refroidissent moins vite que les continents, la capacité calorifique de l'eau étant plus élevée que celle du sol (en moyenne). Il se forme alors dans l'atmosphère des zones de hautes pressions (les anticyclones) au-dessus des continents plus vite refroidis

et des zones de basses pressions (les dépressions) au-dessus des océans moins vite refroidis. Des courants aériens vont alors se développer des hautes pressions vers les basses pressions. Dans la même idée, les grands courants marins sont dus à des différences d'irradiation des masses océaniques.

Ces phénomènes de transport d'énergie des régions excédentaires vers les régions déficitaires tendent à homogénéiser les champs de températures et de pressions de notre planète. Ils conditionnent son équilibre thermique. Sans eux le déséquilibre des températures ne ferait que s'accroître.

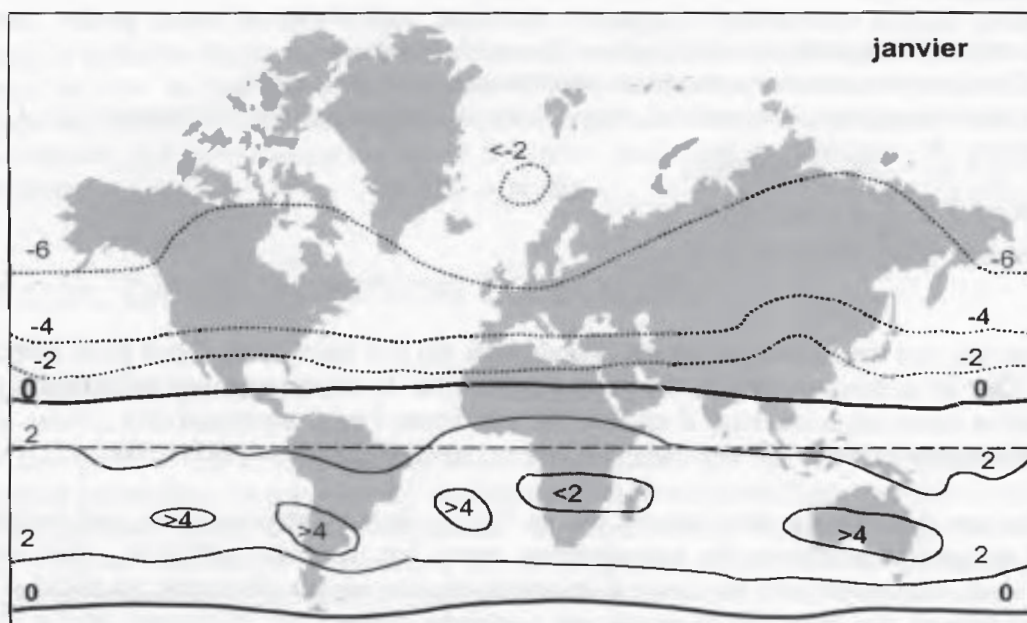


Figure II.11

Bilan radiatif du système Terre-atmosphère pour le mois de janvier.
Les valeurs moyennées sur le mois considéré sont données en $\text{kJ}/\text{cm}^2 \cdot \text{jour}$.

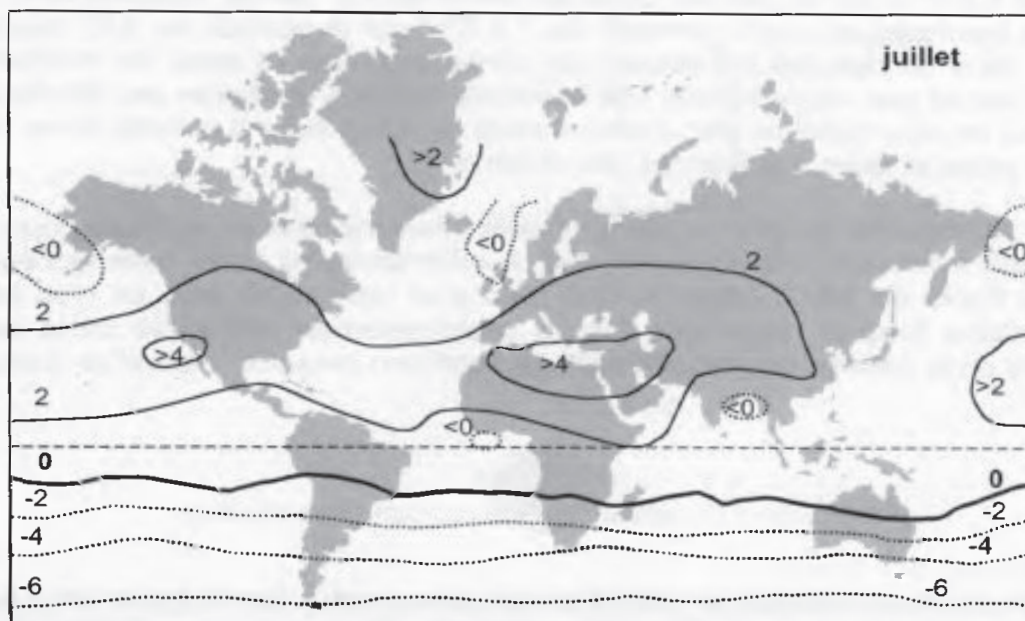


Figure II.12

Bilan radiatif du système Terre-atmosphère pour le mois de juillet.
Les valeurs moyennées sur le mois considéré sont données en $\text{kJ}/\text{cm}^2 \cdot \text{jour}$.

La température d'équilibre du système Terre-atmosphère peut changer si l'énergie solaire absorbée n'est plus égale à l'énergie infrarouge perdue dans l'espace. Supposons par exemple que les dimensions de la couche nuageuse augmentent, entraînant de ce fait un accroissement de l'albédo solaire a^* du système. ($a^*=0,38$ actuellement, cf. fig. II.9). Dans ce cas, un nouvel équilibre est réalisé par changement de la température du système.

* Application II.10

Supposons qu'une couverture nuageuse recouvre uniformément notre globe. Déterminons alors la nouvelle température du système Terre-atmosphère

L'albédo solaire du système est égal à celui des nuages, soit 80 %.

La formule développée plus haut (cf. Application II.7) s'écrit ici (en négligeant T_{sc}) :

$$T = \left[\frac{\alpha^* C^*}{4 \sigma} \right]^{\frac{1}{4}} = \left[\frac{(1 - 0,80) 1353}{4 \times 5,67 \cdot 10^{-8}} \right]^{0,25} = 186 \text{ K} = -87^\circ \text{C}$$

Notre planète s'est refroidie.

Pour ce qui est de la température d'équilibre du sol terrestre, il est plus difficile de se prononcer. Car si la couverture nuageuse augmente, le rayonnement infrarouge émis par le sol terrestre aura plus de mal à quitter le système Terre-atmosphère, l'eau ayant des bandes d'absorption dans l'infrarouge. La Terre devrait donc se réchauffer...

La mise en équations des bilans de la Terre et de l'atmosphère est extrêmement complexe ; le grand nombre de paramètres rend les calculs difficiles. Néanmoins les études menées actuellement tendent à montrer qu'un réchauffement se produit à cause de l'accroissement du taux de dioxyde de carbone dans l'air. Comme on l'a vu, le gaz carbonique absorbe une partie non négligeable de l'infrarouge. La quantité de CO_2 libérée par la combustion des hydrocarbures entraîne un accroissement de sa teneur dans l'air atmosphérique. D'où un effet de serre amplifié et par suite une température d'équilibre du sol terrestre plus élevée. L'accroissement de cette température se monte en moyenne à $0,6^\circ\text{C}$ sur la période correspondant au XX^{e} siècle. Actuellement certains scientifiques avancent un accroissement de 2 à 3°C sur la période du XXI^{e} siècle. Il est certain que dans ce cas, les conséquences climatologiques et donc les incidences sur l'Homme ne seront pas négligeables. Par exemple, certains territoires peu élevés (les îles Maldives pour ne citer qu'elles) disparaîtront sous les eaux suite à la fonte d'une partie de la glace des pôles et donc à la montée des océans.

C'est la raison pour laquelle la communauté internationale se mobilise pour essayer d'enrayer l'accroissement des rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (cf. le protocole de Kyoto de 1997). Mais compte tenu d'un recours de plus en plus important aux combustibles fossiles, pour faire face à l'accroissement inévitable de la demande d'énergie des pays émergents, les objectifs de réduction peuvent apparaître quelque peu utopiques¹...



¹ En trente ans, la consommation mondiale d'énergie renouvelable devrait passer de 1,6 à 4,4 % de la consommation totale d'énergie. Durant la même période, la production d'électricité d'origine nucléaire devrait baisser de 17 à 9 % de la production totale d'énergie électrique. Or les énergies renouvelables et le nucléaire sont les seules sources d'énergie qui n'entraînent pas de libération de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

CHAPITRE III

RÉCEPTION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

L'énergie solaire atteignant une surface donnée dépend directement de l'orientation de celle-ci et de la position du Soleil. Pour récupérer un maximum d'énergie en provenance du Soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du Soleil en fonction du temps est donc fondamentale.

1. CALCUL DE LA POSITION DU SOLEIL

1.1 Paramètres de position

Tout point de la sphère terrestre peut être repéré par deux coordonnées, appelées coordonnées terrestres, à savoir : sa *latitude* φ (positive dans l'hémisphère nord, négative dans l'hémisphère sud) et sa *longitude* L (positive à l'ouest, négative à l'est). Le méridien¹ origine, servant à la mesure de la longitude, est celui de Greenwich. On peut trouver ces coordonnées dans un atlas géographique.

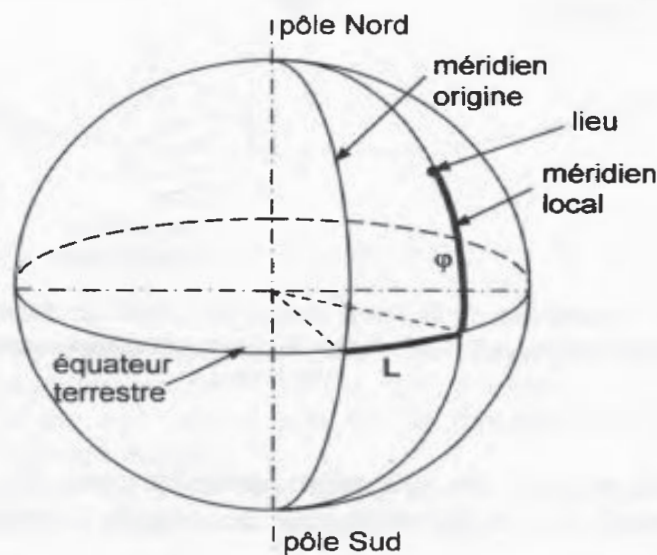


Figure III.1
Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné.

Le tableau III.1 donne les coordonnées terrestres de quelques villes pour lesquelles les diagrammes solaires ont été tracés (cf. la deuxième partie de ce chapitre).

¹ Un méridien terrestre est un demi-cercle passant par les pôles Nord et Sud.

lieu	latitude φ	longitude L
Libreville (Gabon)	0°23'	-9°27'
Mexico (Mexique)	19°24'	99°09'
Mourmansk (Russie)	68°58'	-33°05'
Papeete (Tahiti)	-17°32'	149°34'
Paris	48°52'	-2°20'
Toulouse	43°36'	-1°22'
Ushuaia (Argentine)	-54°48'	68°18'

Tableau III.1 – Coordonnées terrestres (latitude et longitude) des quelques villes choisies pour tracer les diagrammes solaires.

La Terre décrit autour du Soleil une ellipse située dans un plan appelé *plan de l'écliptique*. L'excentricité e de cette ellipse est très faible ($e \approx 0,017$) ; aussi peut-on l'assimiler à un cercle en première approximation. Cela explique la faible variation de la constante solaire $C^* = 1353 \pm 3,4 \text{ \% W/m}^2$.

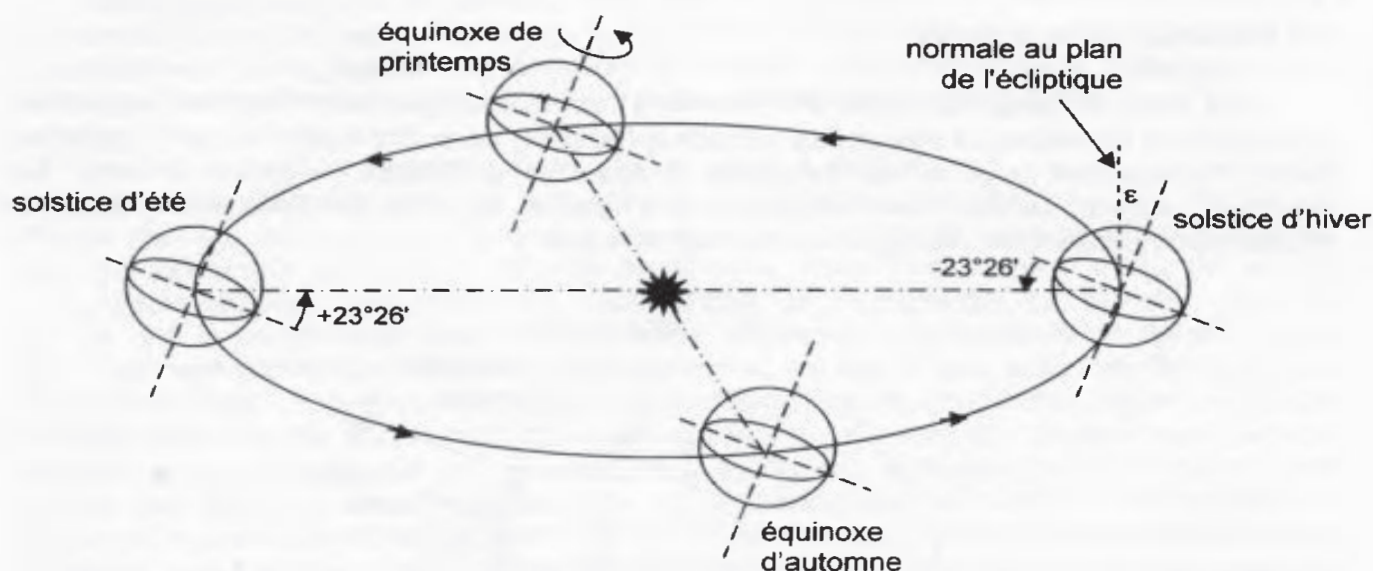


Figure III.2 – Trajectoire de la Terre autour du Soleil. La déclinaison maximale est donnée par l'angle $\varepsilon = 23^\circ 26'$. Noter le point γ correspondant à l'équinoxe de printemps.

L'angle que fait le plan de l'équateur terrestre avec la direction Terre-Soleil est appelé la *déclinaison* δ . Cet angle varie tout au long de l'année de façon symétrique de $-23^\circ 26'$ à $+23^\circ 26'$.

L'angle ε que fait la normale au plan de l'écliptique avec l'axe de rotation de la Terre (ou *axe du Monde*) vaut évidemment $23^\circ 26'$.

La position de la Terre à l'équinoxe de printemps est appelée *point vernal* γ . Mais on constate que l'axe de la Terre décrit, en 25785 ans, un cône de $23,5^\circ$ de demi-angle au sommet, ayant pour axe la normale au plan de l'écliptique. Ce mouvement entraîne le déplacement du point vernal γ (phénomène de *précession des équinoxes*). Il est dû à la

non sphéricité de la Terre qui est renflée à l'équateur et qui, soumise à l'attraction gravitationnelle du soleil et de la lune, est sujette à un *effet gyroscopique*.

L'*année tropique*, temps écoulé entre deux passages de la Terre au point vernal vrai (qui tient compte de la précession des équinoxes soit $-50,3''$ d'angle par an), est de :

365 jours 5 heures 48 minutes 46 secondes.

Ceci implique la correction d'un jour tous les quatre ans (les années bissextiles).

La valeur de la déclinaison peut être obtenue avec une bonne précision par la formule suivante :

$$\delta = 23,45 \sin \left(\frac{360}{365} (n - 81) \right)$$

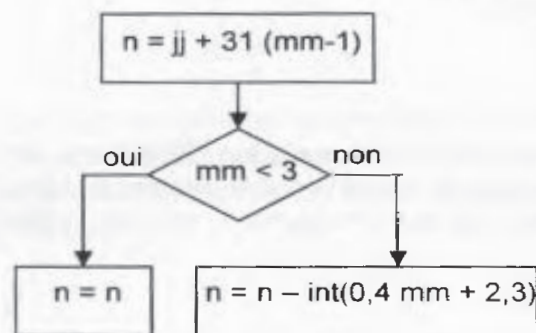
avec n : numéro du jour de l'année (1^{er} janvier $\equiv 1$).

La déclinaison est maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre).

L'organigramme donné à la figure III.3 permet de calculer le numéro n du jour à partir de la date écrite sous la forme jj.mm.

Figure III.3

Organigramme de calcul du numéro du jour de l'année. La fonction "int" consiste à prendre la partie entière de la valeur du terme entre parenthèses.



* Application III.1

Prenons l'exemple du 18 avril.

On a : $jj=18$ et $mm=4$.

$$n = 18 + 31 (4 - 1) = 111$$

$4 < 3$? non

$$n = 111 - \text{int}(0,4 \cdot 4 + 2,3) = 111 - \text{int}(3,9) = 111 - 3 = 108.$$

La position d'un astre dans l'espace peut être repérée par ses *coordonnées horizontales* définies sur la *sphère céleste*¹ (cf. fig. III.4) à savoir :

- sa *hauteur angulaire* h qui est l'angle que fait la direction de l'astre avec le plan horizontal (c'est-à-dire tangent au sol),
- son *azimut* a correspondant à l'angle que fait le plan du *méridien local*² avec le plan vertical passant par l'astre. L'azimut est compté négativement vers l'est, positivement vers l'ouest.

Remarquons que ces coordonnées dépendent du lieu d'observation et que pour cela elles sont appelées aussi *coordonnées locales*. Des calculs solaires effectués en un lieu donné avec ces coordonnées ne pourront donc pas être transposables directement en un autre lieu.

¹ La sphère céleste est la sphère ayant pour centre la Terre et pour rayon la distance entre la Terre et l'astre étudié (le Soleil dans notre cas).

² En un lieu donné sur la planète, le méridien local est contenu dans le plan défini par la perpendiculaire au sol et l'axe nord-sud du plan horizontal (tangent au sol).

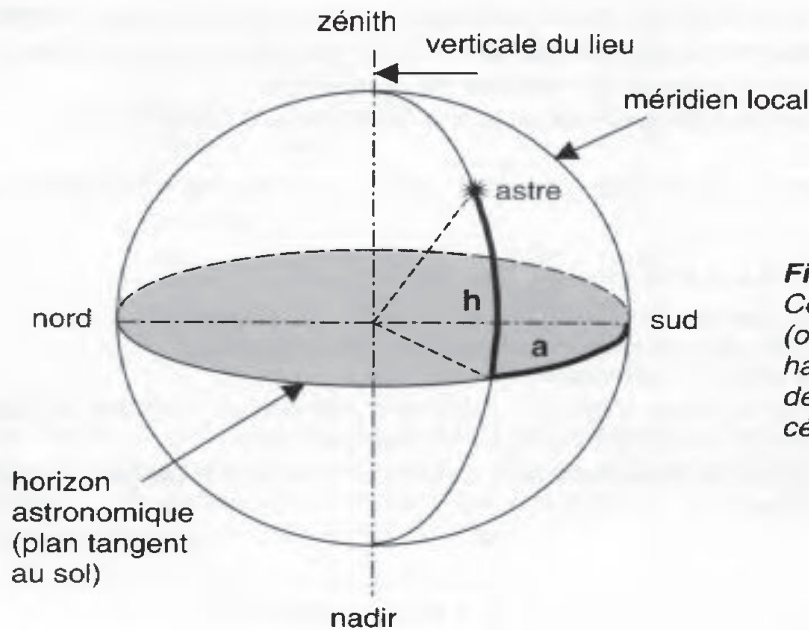


Figure III.4
Coordonnées horizontales (ou locales) d'un astre : hauteur h et azimut a , définies sur la sphère céleste.

À la figure III.5 on retrouve les définitions de la latitude φ et de la déclinaison δ vues plus haut. De plus le Soleil y est représenté dans le plan du méridien local : il est midi solaire. Sa hauteur est alors maximale; elle est notée h_m .

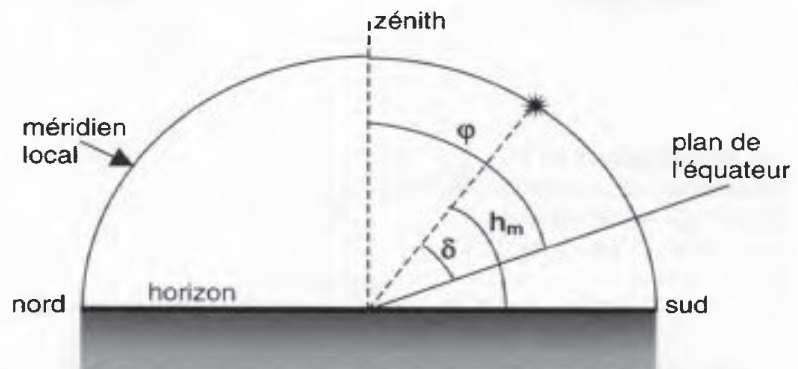


Figure III.5
Coordonnées relevées dans le plan du méridien local lorsque le Soleil s'y trouve.

À partir de la déclinaison δ et de l'angle horaire ω , on définit les *coordonnées horaires*.

L'angle horaire ω est l'angle que fait le plan contenant le *cercle horaire*¹ de l'astre avec le plan contenant le méridien céleste. Il est compté sur l'équateur, positivement à l'ouest, négativement à l'est.

La figure III.6 représente ces deux coordonnées qui sont aussi appelées *coordonnées semi-locales* puisque l'angle horaire ω dépend du lieu d'observation, contrairement à la déclinaison δ .

¹ Un cercle horaire est un cercle passant par l'astre étudié et dont le plan contient l'axe reliant les pôles nord et sud célestes (axe du monde).

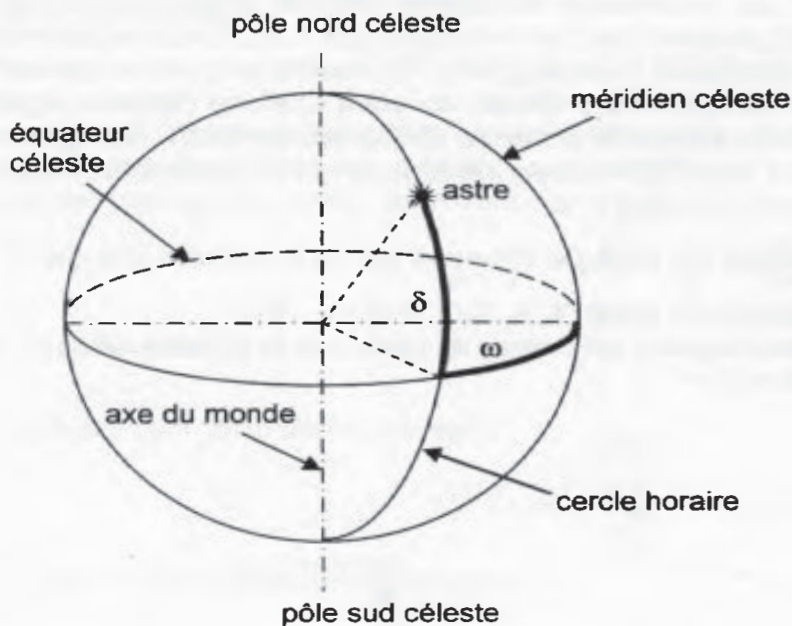


Figure III.6
Coordonnées horaires (ou semi-locales) d'un astre : déclinaison δ et angle horaire ω .

Les *coordonnées équatoriales*, utilisées principalement en astronomie, sont, quant à elles, indépendantes du lieu d'observation. Ce sont la déclinaison δ et l'*ascension droite* α , angle que fait le plan contenant le cercle horaire passant par l'astre et celui passant par le point vernal γ et contenant l'axe du monde.

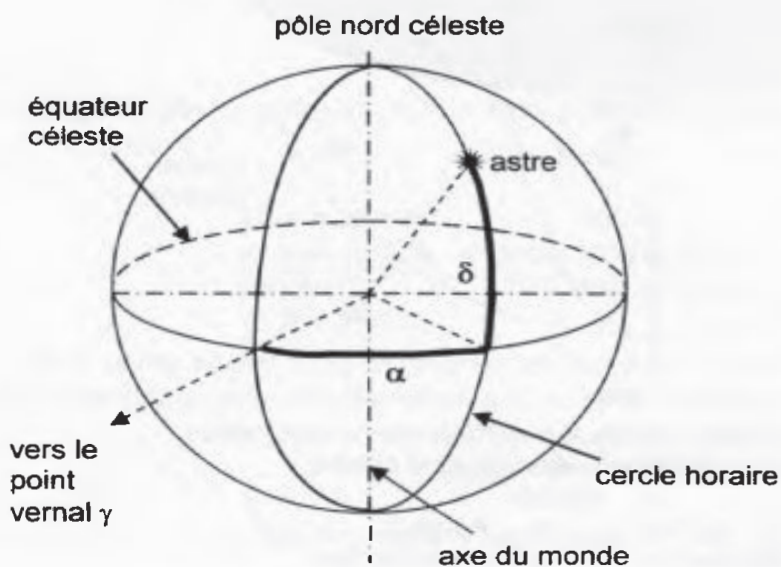


Figure III.7
Coordonnées équatoriales d'un astre : déclinaison δ et ascension droite α .

En énergétique solaire on utilise préférentiellement les coordonnées locales que sont la hauteur h et l'azimut a . Il est donc nécessaire de déterminer des relations permettant de passer des coordonnées horaires (ω, δ) aux coordonnées horizontales (a, h).

Considérons la figure III.8 qui représente la *sphère céleste*, c'est-à-dire la sphère centrée sur la Terre (point O) et passant par l'astre étudié (point A). On a représenté sur la même figure le plan de l'horizon local (disque grisé). En réalité ce plan ne devrait pas passer par le point O mais devrait apparaître décalé du point O d'une distance égale au rayon terrestre. Mais compte tenu de cette distance (6400 km environ), très petite par rapport au rayon de la sphère (1 UA=150 millions de km), on peut confondre le point de la surface terrestre avec le centre O de la Terre.

Le plan de l'équateur se déduit du plan de l'horizon par une rotation d'angle $\frac{\pi}{2} - \varphi$ autour de l'axe est-ouest passant par le point O.

On choisit, comme unité de longueur arbitraire, le rayon de la sphère céleste. On a donc $OA=OH=OK=OP=OT=OW=OZ=1$.

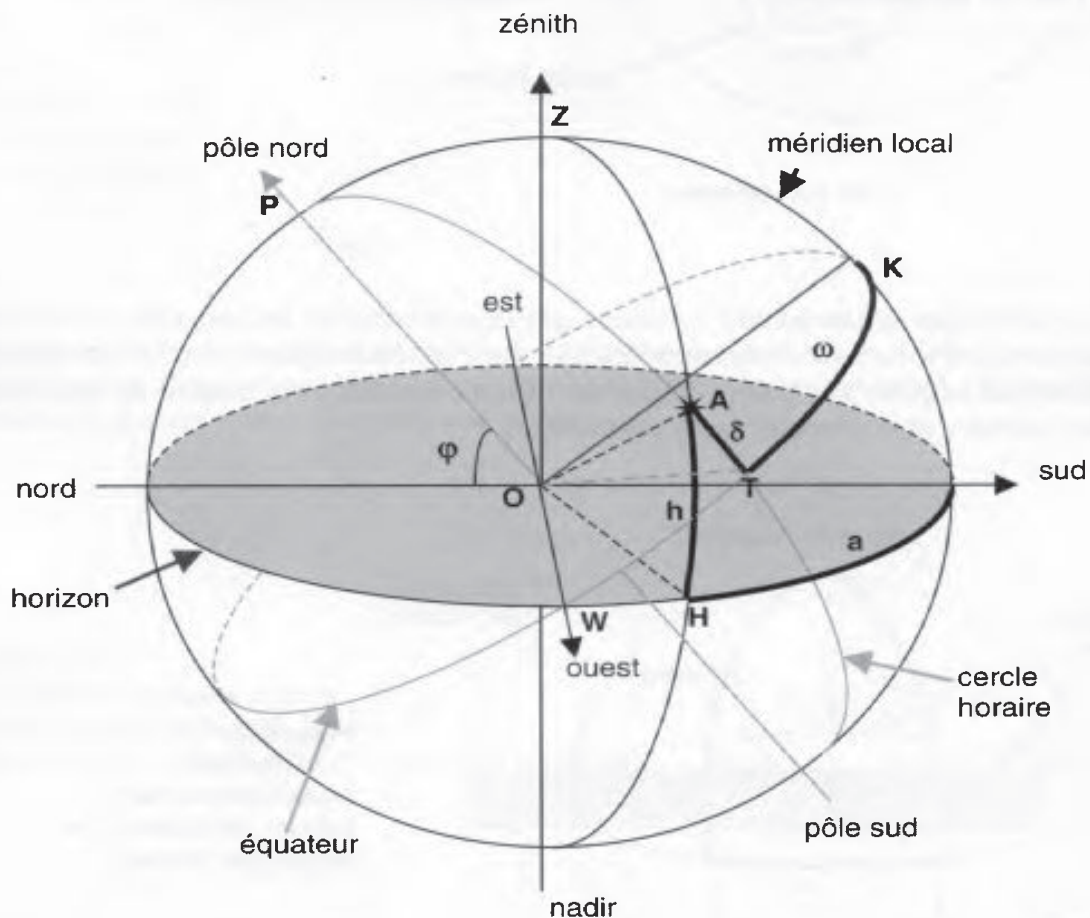


Figure III.8 – Schéma montrant les différentes coordonnées angulaires utilisées en énergétique solaire :

φ	latitude	h	hauteur
a	azimut	ω	angle horaire
δ	déclinaison		

En considérant le plan contenant le cercle horaire, on a :

$$\overrightarrow{OA} = \cos \delta \overrightarrow{OT} + \sin \delta \overrightarrow{OP}$$

Le vecteur \overrightarrow{OA} peut encore s'écrire, en considérant le plan du méridien passant par l'astre A (plan OZA) :

$$\overrightarrow{OA} = \cos h \overrightarrow{OH} + \sin h \overrightarrow{OZ}.$$

En projetant cette expression vectorielle dans le repère orthogonal $(O\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$, correspondant aux directions (ouest, sud, zénith), et en se rappelant que la sphère céleste est une sphère unité, on obtient :

$$\overrightarrow{OA} = \cos h \begin{vmatrix} \sin a \\ \cos a \\ 0 \end{vmatrix} + \sin h \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos h \cdot \sin a \\ \cos h \cdot \cos a \\ \sin h \end{vmatrix}$$

On a d'autre part (plan de l'équateur) :

$$\overrightarrow{OT} = \cos \omega \overrightarrow{OK} + \sin \omega \overrightarrow{OW}$$

ce qui peut s'écrire dans le repère $(O\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$:

$$\overrightarrow{OT} = \cos \omega \begin{vmatrix} 0 \\ \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{vmatrix} + \sin \omega \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sin \omega \\ \cos \omega \cdot \sin \varphi \\ \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{vmatrix}.$$

Quant au vecteur \overrightarrow{OP} , ses coordonnées dans le repère $(O\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ sont évidentes :

$$\overrightarrow{OP} = \begin{vmatrix} 0 \\ -\cos \varphi \\ \sin \varphi \end{vmatrix}.$$

En projetant dans le repère $(O\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ la première expression du vecteur \overrightarrow{OA} écrite plus haut, on obtient :

$$\begin{vmatrix} \cos h \cdot \sin a \\ \cos h \cdot \cos a \\ \sin h \end{vmatrix} = \cos \delta \begin{vmatrix} \sin \omega \\ \cos \omega \cdot \sin \varphi \\ \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{vmatrix} + \sin \delta \begin{vmatrix} 0 \\ -\cos \varphi \\ \sin \varphi \end{vmatrix}$$

On peut alors écrire trois expressions scalaires, appelées *formules de Gauss*, reliant entre elles les quatre coordonnées a , h , ω et δ , pour une latitude φ donnée :

$$\cos h \cdot \sin a = \cos \delta \cdot \sin \omega$$

$$\cos h \cdot \cos a = \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \sin \varphi - \sin \delta \cdot \cos \varphi$$

$$\sin h = \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \varphi + \sin \delta \cdot \sin \varphi$$

Ces formules sont très importantes puisqu'elles permettent de déterminer l'azimut a et la hauteur h du soleil dès que l'on connaît la déclinaison δ et l'angle horaire ω , en un lieu de latitude φ . Nous avons vu comment déterminer la déclinaison à partir du numéro du jour. L'angle horaire ω , quant à lui, est déterminé à partir de l'heure pour laquelle nous voulons connaître la position du soleil. Ici interviennent donc des paramètres de temps.

1.2 Paramètres de temps

La position du soleil dans le ciel nous renseigne sur le *temps solaire vrai* (TSV ou *Solar Time* - ST - en anglais). C'est le temps donné par les cadrans solaires.

Il existe une relation simple entre l'heure solaire TSV et l'angle horaire ω :

$$\omega = (\text{TSV} - 12) \times 15$$

avec TSV en heures et ω en degrés.

Cette formule provient du fait que le soleil semble tourner dans le plan de l'équateur de 360° en 24 heures soit 15° par heure. De plus, le choix arbitraire de prendre l'angle horaire nul quand le soleil est dans le plan du méridien local (il est alors midi solaire) finit d'expliquer la formule.

* Application III.2

Déterminons les coordonnées locales du soleil à Toulouse ($\varphi = 43,6^\circ$) pour la journée du 18 avril à 10 h TSV.

On a vu que le numéro du jour $n = 108$.

$$\text{La déclinaison } \delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{108 - 81}{365}\right) = 10,5^\circ$$

$$\text{L'angle horaire } \omega = (10 - 12) \times 15 = -30^\circ$$

La hauteur h est donnée en résolvant l'équation :

$$\sin h = \cos(10,5^\circ) \times \cos(-30^\circ) \times \cos(43,6^\circ) + \sin(10,5^\circ) \times \sin(43,6^\circ) \Rightarrow h = 47,9^\circ$$

L'azimut a est déterminée grâce à l'équation :

$$\sin a = \frac{\cos(10,5^\circ) \times \sin(-30^\circ)}{\cos(47,9^\circ)} \Rightarrow a = -47,2^\circ$$

Comme on l'a déjà vu, la trajectoire de la Terre autour du soleil est elliptique (première loi de Képler)¹.

Durant ce mouvement, le rayon vecteur Soleil-Terre balaie des aires égales dans des temps égaux (deuxième loi de Képler). Tout ceci, ajouté au fait que l'axe de rotation de la Terre est incliné par rapport au plan de l'écliptique, fait que la *durée du jour solaire vrai*² varie selon les époques de l'année (cf. figure III.9).

On introduit alors la notion de *temps solaire moyen* (TSM) qui varie de ± 16 mn par rapport au TSV.

On a :

$$\text{TSM} = \text{TSV} - \text{ET}$$

où le terme correctif ET est appelé *équation du temps*.

Cette quantité peut être calculée par la formule suivante :

$$\text{ET (en mn)} = -0,0002 + 0,4197 \cos(\beta) - 7,3509 \sin(\beta) - 3,2265 \cos(2\beta) - 9,3912 \sin(2\beta) - 0,0903 \cos(3\beta) - 0,3361 \sin(3\beta)$$

$$\text{dans laquelle } \beta \text{ (en degrés) vaut : } \beta = 360 \frac{n}{366}$$

¹ En réalité on n'a pas affaire à des lois mais bien à des théorèmes puisque la mécanique (étude des mouvements à accélération centrale) permet de démontrer les fameuses *lois de Képler*.

² La durée du jour solaire vrai est le temps mesuré entre deux passages consécutifs du soleil dans le plan du méridien local.

et où n est le numéro du jour de l'année (cf. figure III.10).

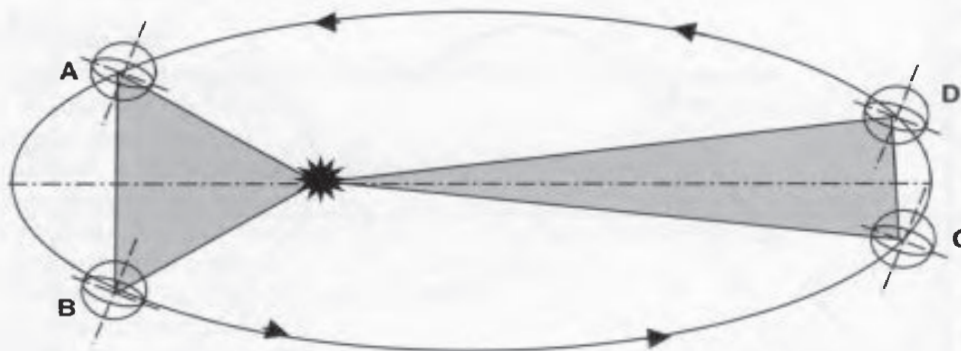


Figure III.9 – Trajectoire elliptique de la Terre autour du Soleil. La deuxième loi de Képler indique que les aires (en grisé) balayées durant des temps égaux par le rayon vecteur Soleil-Terre sont égales :
temps pour parcourir l'arc (AB) = temps pour parcourir l'arc (CD)
vitesse le long de l'arc (AB) > vitesse le long de l'arc (CD)

Le *temps universel* TU est égal au TSM du méridien origine (méridien de Greenwich). On a donc :

$$TU = TSM + \frac{L}{15}$$

avec L la longitude exprimée en degrés et les temps en heures¹.

L'heure que nous lisons aux horloges publiques est le *temps légal* TL. Il est égal au temps universel affecté des corrections de *fuseau* C_1 (>0 à l'est de Greenwich, <0 à l'ouest, la ligne de changement de date passant dans l'océan Pacifique) ainsi que d'une correction de saison C_2 s'il y a lieu.

$$TL = TU + C_1 + C_2$$

En France : $C_1 = +1$ h et
 $C_2 = 0$ en hiver et $C_2 = +1$ h en été.

Ces différents passages d'une heure à l'autre sont résumés dans le tableau III.2.

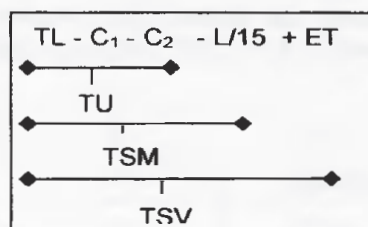


Tableau III.2 – Détermination du temps légal TL à partir du temps solaire vrai TSV

¹ La différence de longitude entre Brest ($L=4,48^\circ$) et Strasbourg ($L=-7,75^\circ$) étant de $12,23^\circ$, la différence sur le temps solaire moyen entre ces deux villes est de : $12,23/15=0,82$ h = 49 minutes. On comprend qu'un pays étalé en latitude ne peut avoir une heure légale unique. Dans le cas des USA par exemple, il y a 4 heures différentes. La Russie, quant à elle, utilise 11 fuseaux horaires; quand il est 14 h à Moscou, il est minuit à Ouelen, ville la plus à l'Est du pays (presqu'île de Tchoukotka).

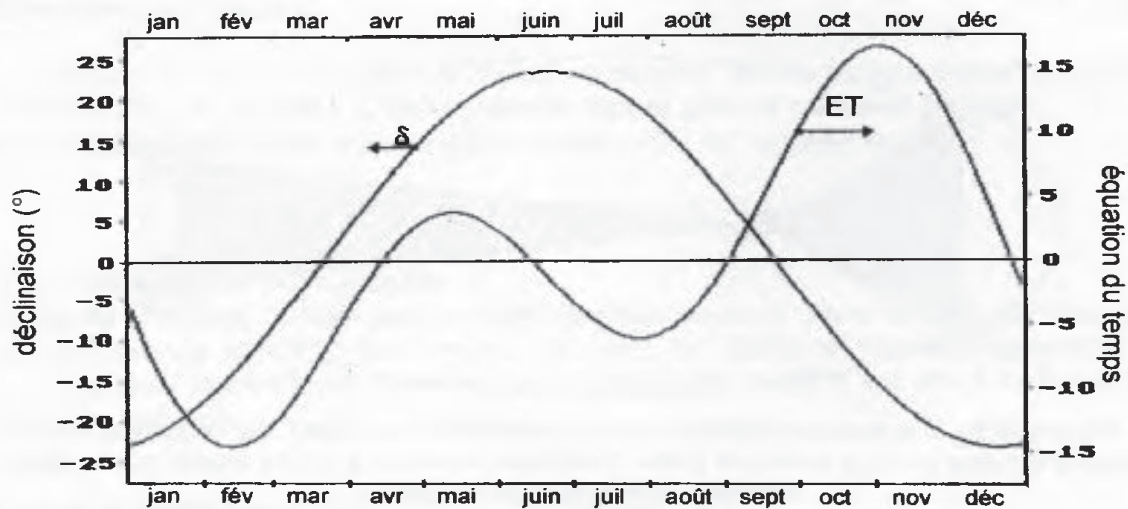


Figure III.10 – Évolution de la déclinaison δ et de l'équation du temps ET au cours de l'année.

* Application III.3

Calculons le temps solaire vrai TSV, le 18 avril à Toulouse (longitude $L = -1,37^\circ$), si l'heure légale TL est 10 h.

La correction de fuseau $C1 = +1$ h pour la France et $C2 = +1$ h en considérant l'heure d'été.

Le temps universel $TU = 10 - 1 - 1 = 8$ h.

La correction de longitude s'écrit : $L/15 = -1,37/15 = -0,09$ h.

D'où le temps solaire moyen $TSM = 8 - (-0,09) = 8,09$ h.

Le numéro du jour $n = 108$.

Le paramètre β apparaissant dans l'équation du temps ET s'écrit :

$$\beta = \frac{360}{366} 108 = 106,2^\circ$$

L'équation du temps donne alors :

$$ET = -0,0002 + 0,4197 \cos(106,2^\circ) - 7,3509 \sin(106,2^\circ) - 3,2265 \cos(2 \times 106,2^\circ) - 9,3912 \sin(2 \times 106,2^\circ) - 0,0903 \cos(3 \times 106,2^\circ) - 0,3361 \sin(3 \times 106,2^\circ)$$

$$\Rightarrow ET = 0,7 \text{ minute} = 0,01 \text{ h.}$$

D'où le temps solaire vrai :

$$TSV = 8,09 + 0,01 = 8,10 \text{ h} = 8 \text{ h } 6 \text{ mn.}$$

1.3 Cas particuliers

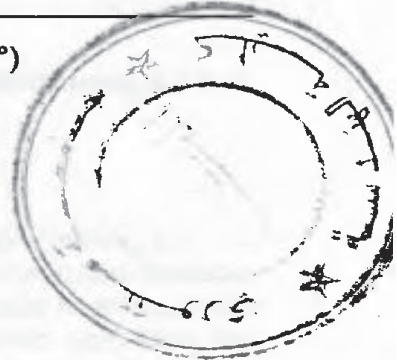
Les quantités relatives au lever et au coucher du soleil ($h=0$) sont marquées de l'indice inférieur "o" et celles relatives au *midi solaire* (12 h TSV, $a=\omega=0$) de l'indice "m".

On a donc :

- hauteur à midi solaire $h_m = \sin^{-1}[\cos(\delta - \varphi)]$
- angle horaire au coucher $\omega_0 = \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta)$
- azimut au coucher $a_0 = \cos^{-1}(-\sin \delta / \cos \varphi)$
- durée du jour (en h) $ddj = 2 \omega_0 / 15$

Remarques : si $\tan \varphi \cdot \tan \delta \geq 1$, le soleil ne se couche pas ($\omega_0 = a_0 = 180^\circ$)

si $\tan \varphi \cdot \tan \delta \leq -1$, le soleil ne se lève pas ($\omega_0 = a_0 = 0^\circ$)



* Application III.4

Dans le cas de Mourmansk en Russie ($\varphi=68,97^\circ$), nous trouvons :

- pour la journée du 18 avril,
 - la déclinaison $\delta=10,5^\circ$
 - la hauteur à midi solaire : $h_m=\sin^{-1}[\cos(10,5^\circ - 68,97^\circ)]=31,5^\circ$
 - l'angle horaire au coucher : $\omega_0=\cos^{-1}[-\tan(68,97^\circ) \times \tan(10,5^\circ)]=118,8^\circ$
 - l'azimut au coucher : $a_0=\cos^{-1}[-\sin(10,5^\circ) / \cos(68,97^\circ)]=120,5^\circ$
 - la durée du jour : $ddj=2 \times 118,8 / 15=15,8$ h
- pour la journée du 22 juin (solstice d'été),
 - la déclinaison $\delta=23,4^\circ$
 - $\tan(68,97^\circ) \times \tan(23,4^\circ) = 1,13 > 1 \Rightarrow$ le soleil ne se couche pas.
- pour la journée du 22 décembre (solstice d'hiver),
 - la déclinaison $\delta=-23,4^\circ$
 - $\tan(68,97^\circ) \times \tan(-23,4^\circ) = -1,13 < 1 \Rightarrow$ le soleil ne se lève pas.

Quand on recherche la valeur d'une grandeur solaire sur un mois donné, on peut en première approximation, la déterminer pour le 15 du mois considéré puis multiplier la valeur obtenue par le nombre de jours du mois. Cela divise par 30 environ le nombre de calculs à effectuer et l'expérience montre que le résultat est très proche de celui obtenu avec un calcul jour par jour.

Le tableau ci-dessous donne certaines grandeurs relatives à la journée du 15 pour chacun des mois de l'année et pour une latitude $\varphi=43,6^\circ$ (ce qui est le cas de la ville de Toulouse par exemple).

mois	nombre de jours dans le mois	n	δ (°)	ω_0 (°)	ddj (h)
		le 15 du mois		pour Toulouse	
janvier	31	15	-21,3	68,2	9,1
février	28	46	-13,3	77,0	10,3
mars	31	74	-2,8	87,3	11,6
avril	30	105	9,4	99,1	13,2
mai	31	135	18,8	108,9	14,5
juin	30	166	23,3	114,2	15,2
juillet	31	196	21,5	112,1	14,9
août	31	227	13,8	103,5	13,8
septembre	30	258	2,2	92,1	12,3
octobre	31	288	-9,6	80,7	10,8
novembre	30	319	-19,1	70,7	9,4
décembre	31	349	-23,3	65,7	8,8

Tableau III.3 - Ce tableau fournit pour chaque mois de l'année, le nombre de jours (année non bissextile) et pour le 15 du mois : le numéro n du jour ainsi que la déclinaison δ (en degrés). On y trouve aussi, pour une latitude $\varphi=43,6^\circ$ (cas de Toulouse) : l'angle horaire au coucher ω_0 (en degrés) et la durée du jour ddj (en heures).

1.4 La gnomonique

*Hora fugit, sol manet*¹
*Vulnerant omnes, ultima nece*²
*Vivere memento*³

La gnomonique est la science des cadrans solaires. D'une façon générale, un cadran solaire est un ensemble de lignes tracées sur une surface (appelée *table*) où le déplacement soit de l'ombre d'un *style* (tige fixe), soit d'une tache de lumière formée par un petit trou dans une plaque fixe, permet de lire les heures au cours de la journée. La table peut être horizontale, verticale ou bien d'orientation quelconque. Le plus souvent elle est plane, mais elle peut néanmoins prendre toutes sortes de forme : sphérique, cubique, ou même quelconque ce qui laisse libre choix à l'esthétique, le cadran solaire étant de nos jours plus un objet de décoration qu'un instrument utile.

Un cadran solaire plan sera dit :

- *équatorial* si sa table est parallèle au plan de l'équateur et son style parallèle à l'axe du monde,
- *oriental* si sa table est dans le plan du méridien local avec sa normale orientée vers l'est,
- *occidental* dans le cas opposé au précédent (normale orientée à l'ouest),
- *méridional* quand cette normale est orientée plein sud,
- *septentrional* quand elle est orientée au nord (dans l'hémisphère sud),
- *déclinant* quand elle est quelconque.

Le principe des cadrans solaires fait qu'ils indiquent le temps solaire vrai, le TSV. On peut leur faire indiquer un temps proche du temps légal TL en décalant toutes les heures de la longitude du lieu puis en faisant les corrections de fuseau et de saison. L'erreur se réduit alors à l'équation du temps ET. Cette erreur peut être corrigée en traçant une courbe en forme de huit, appelée *analemme* ou *méridienne de temps moyen*, autour de la ligne d'angle horaire nul (ensemble des points indiquant le midi solaire), courbe qui n'est autre que la représentation de l'équation du temps.

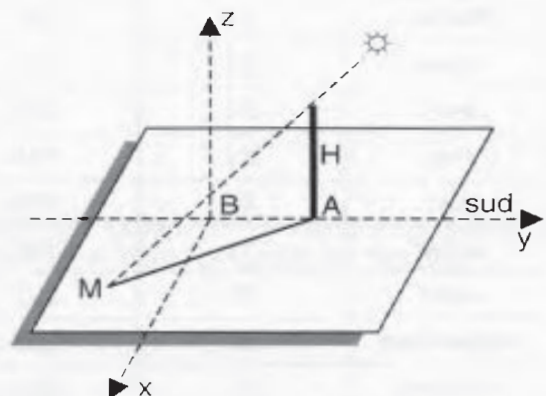
* Application III.5

Considérons un cadran solaire horizontal, appelé *gnomon*, comme celui représenté à la figure ci-contre pour lequel un style⁴ de longueur H est implanté au point A . Le sommet de l'ombre du style est repéré par le point $M(x,y)$, où x et y sont ses coordonnées dans le repère (Bx,By) .

On choisit la longueur (BA) de telle façon que le point M se trouve en B à midi solaire ($\omega=0$) lors des équinoxes ($\delta=0$). Cette condition permet d'écrire :

$$\sin h_m = \cos \varphi \quad \text{soit} \quad h_m = \frac{\pi}{2} - \varphi \quad \text{et} \quad \text{comme}$$

$$AB = \frac{H}{\tan h_m} \quad \text{on peut écrire : } AB = H \tan \varphi.$$



¹ Le temps passe, le soleil dure. Maxime que l'on rencontre sur certains cadrans solaires.

² Toutes blessent, la dernière tue (en parlant des heures).

³ Souviens toi de vivre.

⁴ Pour un cadran dont la table n'est pas horizontale (cadran équatorial, tropical, mural...), on conserve le mot "gnomon" pour désigner le style, c'est-à-dire la tige dont l'ombre indique l'heure.

Déterminons l'équation des isohoraires (courbes de même TSV)

On a :

$$\vec{BM} = \vec{BA} - \vec{MA}$$

et par suite :

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = H \tan \varphi - \frac{H}{\tan h} \cos a \end{cases}$$

où (a,h) sont les coordonnées locales du soleil. En utilisant les formules de Gauss, il vient :

$$\begin{cases} x = -H \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \omega \cdot \cos \delta \cdot \cos \varphi} \\ y = H \frac{\sin \delta}{\cos \varphi [\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \omega \cdot \cos \delta \cdot \cos \varphi]} \end{cases}$$

En éliminant δ , on obtient l'équation des isohoraires :

$$y = \frac{1}{\sin \varphi \cdot \tan \omega} x + \frac{H}{\sin \varphi \cdot \cos \varphi}$$

Ce sont des droites paramétrées par l'angle horaire ω , c'est-à-dire TSV.

Notons que ce réseau de droites dépend de l'angle φ , donc de la latitude du lieu d'implantation du cadran solaire. Si on l'installe en un lieu de latitude différente, il donnera un TSV erroné.

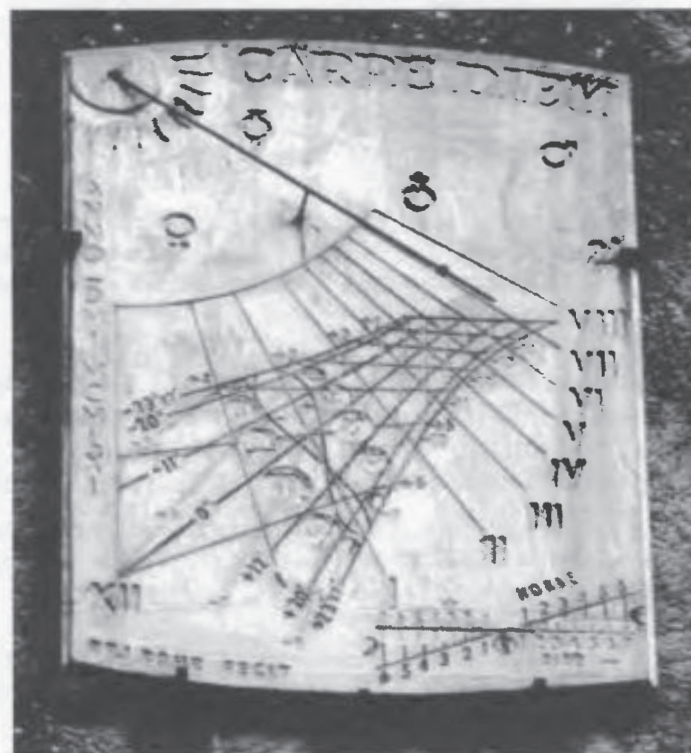


Photo Thérèse Galan

Figure III.11

*Cadran solaire vertical
à Carcassonne dans l'Aude.*

*On peut y lire la maxime "Carpe Diem"
(Profite du jour).*

*On note la présence de l'analemme (en forme de
huit) permettant la correction de l'équation du
temps.*

2. DIAGRAMME SOLAIRE

L'énergie solaire reçue par un capteur dépend de l'orientation que fait celui-ci avec le Soleil ; aussi est-il intéressant de connaître rapidement les coordonnées horizontales de l'astre du jour en fonction de la journée choisie et de l'heure désirée. Pour cela on trace un diagramme circulaire appelé *diagramme solaire*, sur lequel sont représentés l'azimut a par des rayons issus du centre du diagramme et la hauteur h par des cercles concentriques. Un réseau de courbes représente la trajectoire du soleil pour différentes journées. Ce réseau est limité par les courbes relatives aux solstices d'hiver et d'été.

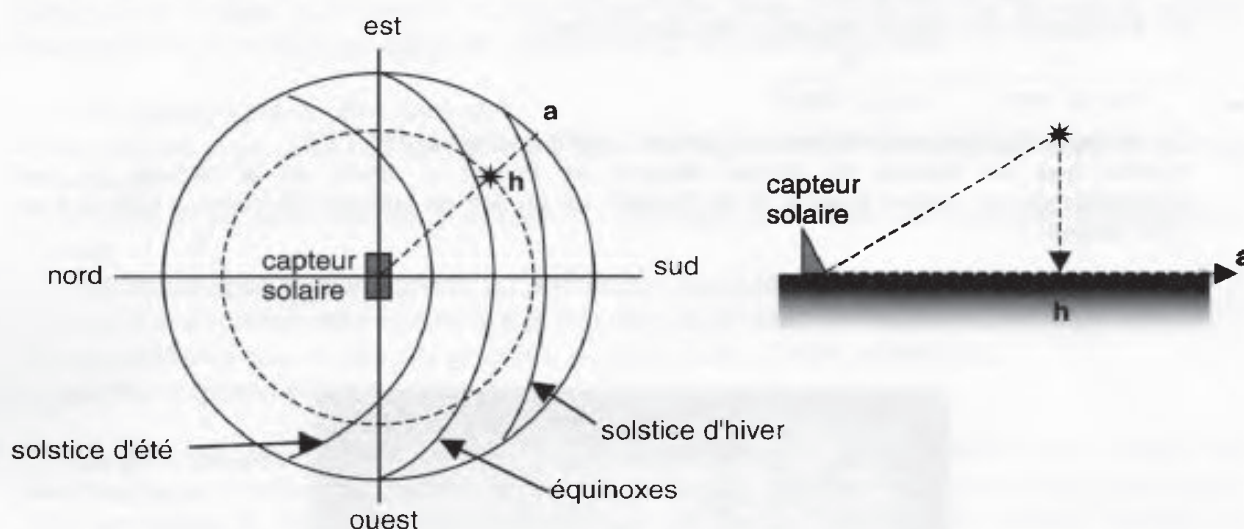


Figure III.12 – Représentation dans le plan horizontal (à gauche) et dans le plan azimutal (à droite) des coordonnées (a, h) du soleil dans le cas d'un capteur situé dans l'hémisphère nord. On a représenté les deux courbes correspondant aux solstices ainsi que celle correspondant aux équinoxes.

L'intérêt d'un tel diagramme en énergétique solaire est de renseigner rapidement l'utilisateur sur l'effet de masque dû à un obstacle (immeuble, balcon, etc. pouvant occulter le soleil une partie du temps).

L'organigramme simplifié ci-dessous permet de suivre la construction d'un tel diagramme.

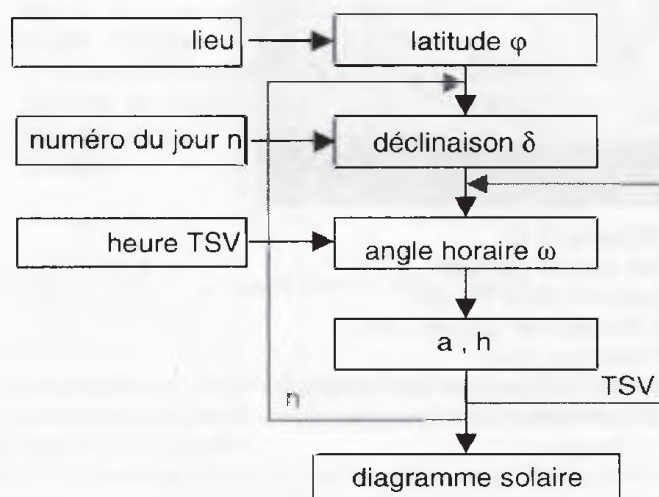


Figure III.13 – Organigramme simplifié permettant le traçage du diagramme solaire pour une latitude donnée.

Les diagrammes qui suivent ont été calculés pour différentes latitudes φ . Un même diagramme peut servir à plusieurs lieux sur notre planète dans la mesure où la latitude de ces derniers est la même. On trouvera après chaque diagramme un tableau fournissant un certain nombre de lieux dont la latitude est proche de celle du calcul.

La coordonnée h (hauteur du soleil) est mesurée par des cercles concentriques espacés de 10° .

La coordonnée a (azimut) est mesurée par des rayons issus du centre du diagramme et espacés de 10° .

Chaque courbe représente la position du soleil pour une valeur donnée de la déclinaison δ , c'est-à-dire pour deux jours de l'année, sauf pour les deux courbes représentant les solstices et correspondant à une journée unique. Le tableau III.4 donne, en fonction du numéro de la courbe, le ou les jours correspondants ainsi que la valeur de la déclinaison.

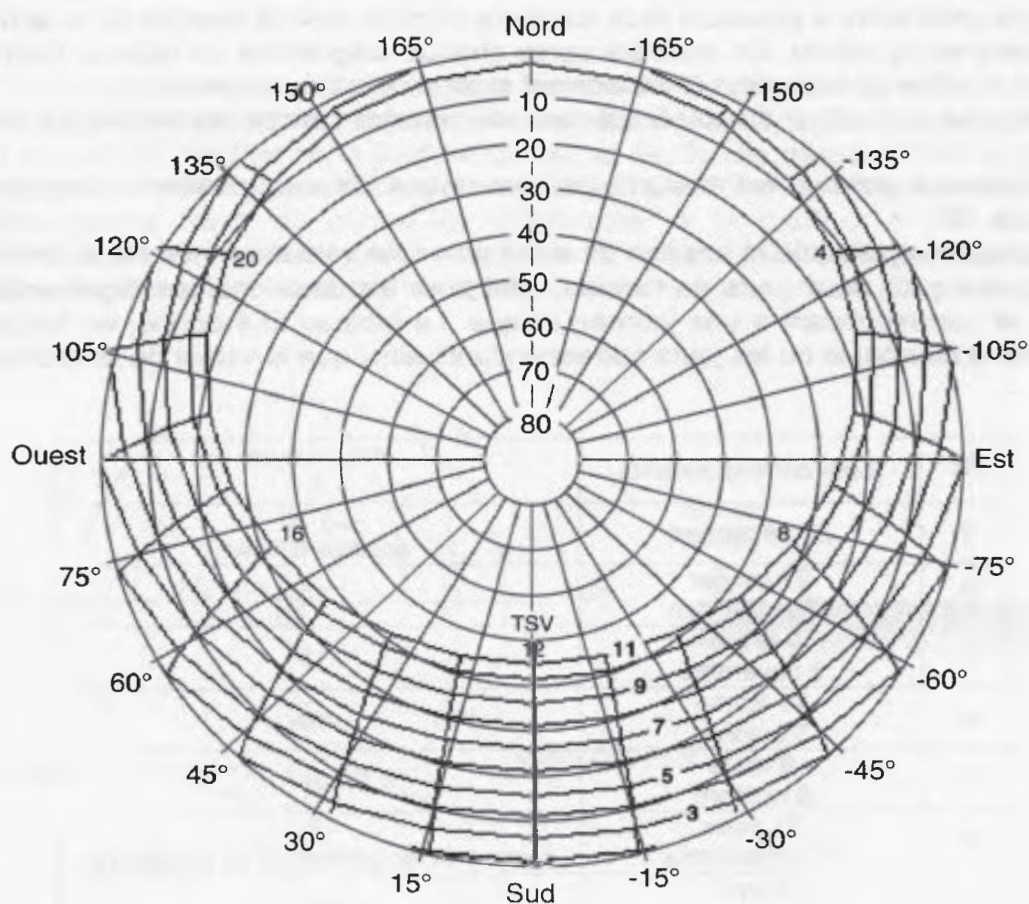
N°	jours correspondants	déclinaison δ
1	21 décembre	-23°26' solstice d'hiver
2	21 janvier 22 novembre	-20
3	9 février 3 novembre	-15
4	23 février 3 octobre	-10
5	8 mars 6 octobre	-5
6	21 mars 21 septembre	0° équinoxes de printemps et d'automne
7	3 avril 10 septembre	5°
8	16 avril 28 août	10°
9	1 mai 12 août	15°
10	21 mai 24 juillet	20°
11	21 juin	23°26' solstice d'été

Tableau III.4 – Correspondance entre les numéros des courbes et les jours de l'année pour la lecture des diagrammes solaires.

Les isohoraires sont des courbes rejoignant les points de même heure TSV (temps solaire vrai).

Dans les pages qui suivent, on a tracé les diagrammes solaires pour sept latitudes différentes :

figure	III.14	III.15	III.16	III.17	III.18	III.19	III.20
latitude φ	68°58'	48°52'	43°36'	23°26'	0°23'	-17°32'	-54°48'



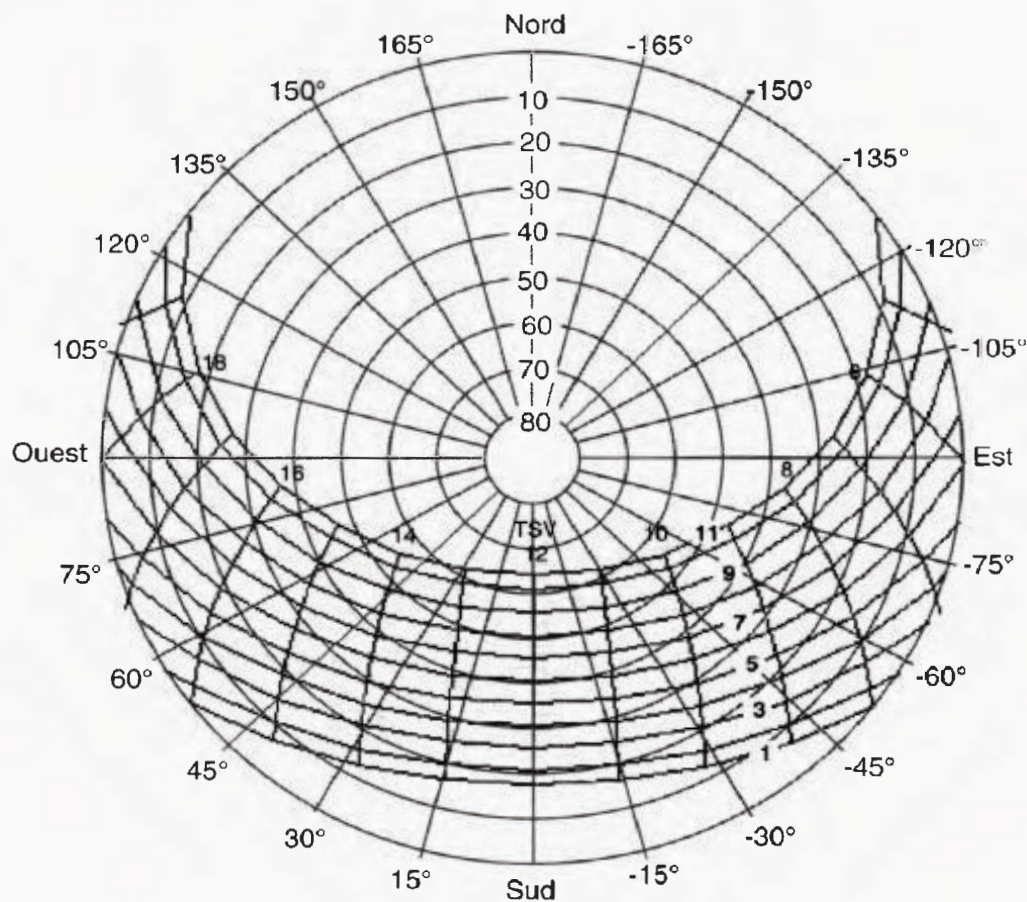
latitude 68°58'			
lieu	latitude	longitude	pays
Mourmansk	68°58'	-1°22'	Russie
Point Hope	68°22'	166°34'	USA (Alaska)
Taloyoak	69°35'	93°38'	Canada
Tromsø	69°39'	-18°54'	Norvège

Figure III.14

On appelle cercle polaire arctique, le parallèle tracé pour une latitude nord de 66°34'. Cette latitude correspond au complément à 90° de l'angle $\varepsilon = 26°34'$ que fait l'axe de la Terre avec la perpendiculaire au plan de l'écliptique : $90° - 23°26' = 66°34'$.

Au-delà du cercle polaire boréal, le soleil ne se couche pas certains jours de l'année (l'été) et ne se lève pas certains jours d'hiver.

On constate ce phénomène sur le diagramme avec une courbe 11 (solstice d'été) qui se ferme sur elle-même et une courbe 1 (solstice d'hiver) qui est absente.



latitude 48°52'			
lieu	latitude	longitude	pays
Brno	49°13'	-16°37'	Rép. Tchèque
Dniepropetrovsk	48°27'	-35°02'	Ukraine
Oulan-Bator	47°56'	-106°53'	Mongolie
Paris	48°52'	-2°22'	France
Qiqihar	47°21'	-123°55'	Chine (Heilongjiang)
Stuttgart	48°47'	-9°11'	Allemagne
Vancouver	49°18'	123°07'	Canada (Colombie-Britannique)

Figure III.15

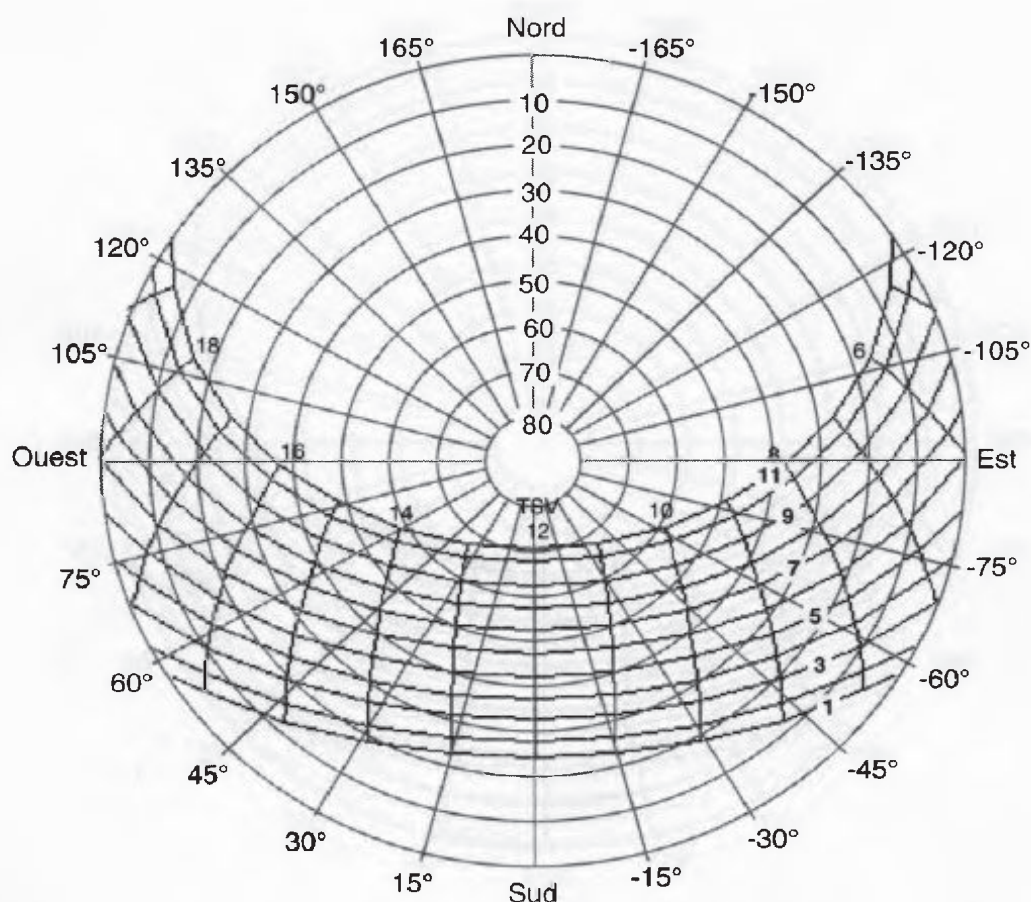
Ce diagramme correspond à la latitude de Paris.

On constate par exemple que la journée du solstice d'hiver (courbe 1) ne dure que

$16 - 8 = 8$ heures

et que la journée correspondant au solstice d'été (courbe 11) dure environ

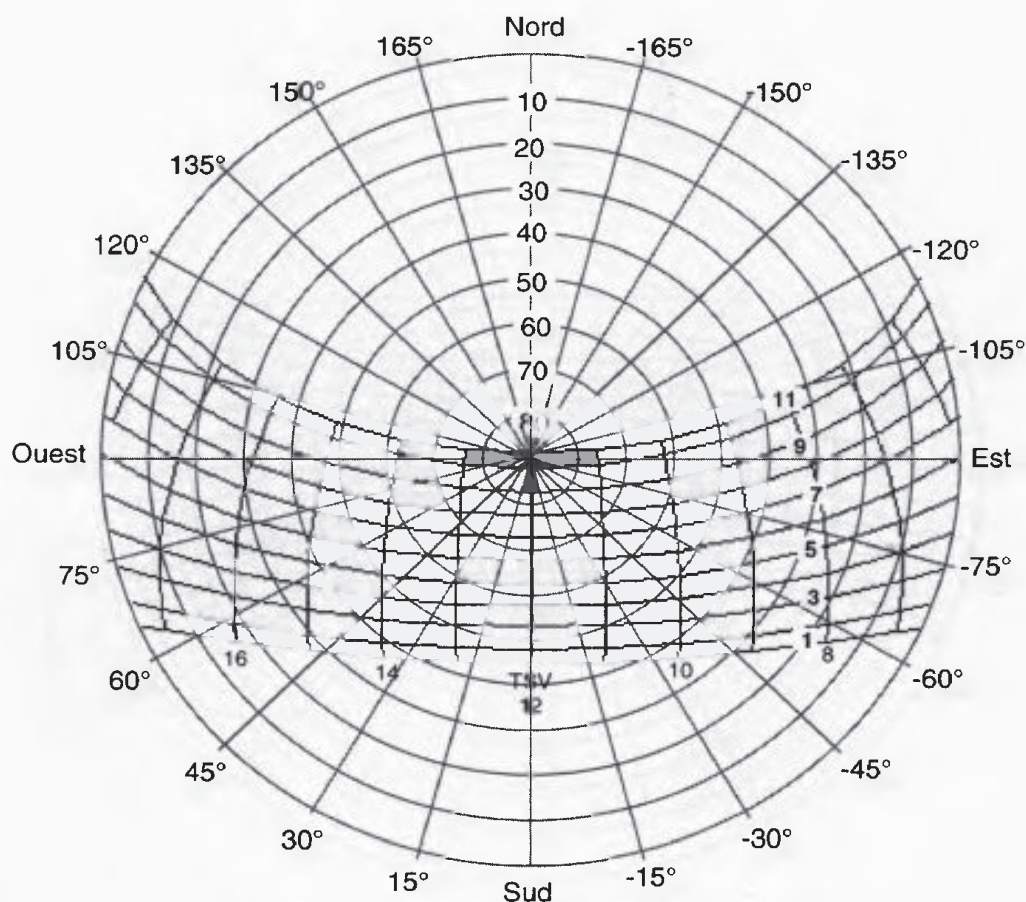
$20 - 4 = 16$ heures.



latitude 43°36'			
lieu	latitude	longitude	pays
Almaty	43°18'	-76°56'	Kazakhstan
Florence	43°46'	-11°15'	Italie
Groznyï	43°20'	-45°39'	Russie (Tchéchénie)
Marseille	43°18'	-5°24'	France
Milwaukee	43°03'	87°55'	USA (Wisconsin)
Portland	43°39'	70°17'	Maine (USA)
Sapporo	43°04'	-141°18'	Japon
Sarajevo	43°51'	-18°25'	Bosnie-Herzégovine
Toronto	43°39'	79°23'	Canada (Ontario)
Toulouse	43°36'	-1°22'	France
Urumqi	43°48'	-8°32'	Chine (Xinjiang)
Vladivostok	43°10'	-131°56'	Russie

Figure III. 16

La latitude permet de connaître les durées d'ensoleillement par ciel clair, mais ne permet pas d'en déduire la qualité du climat. Celui-ci dépend fortement de l'environnement de la ville considérée. On le voit clairement avec Toulouse et Marseille dont les conditions climatiques moyennes ne sont pas les mêmes.



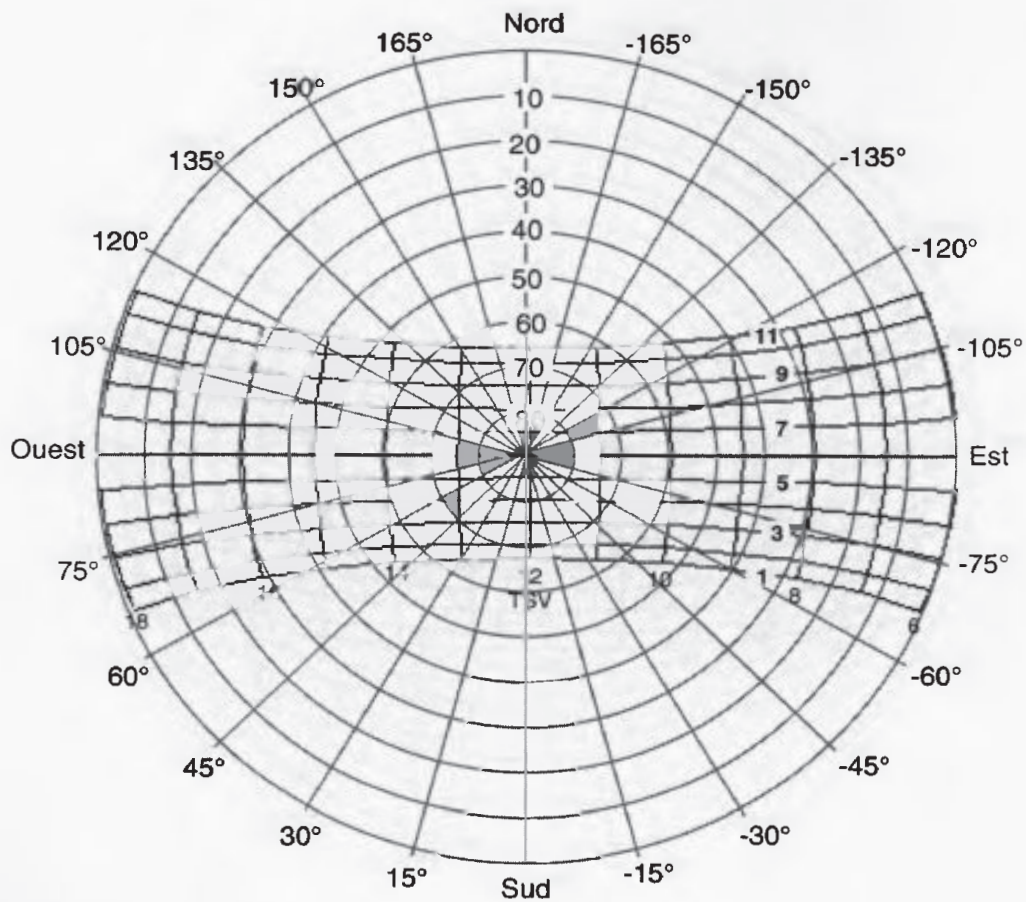
latitude 23°26'			
lieu	latitude	longitude	pays
Bhopal	23°16'	-77°31'	Inde
Canton	23°10'	-113°12'	Chine (Guangdong)
Ciudad Victoria	23°47'	99°08'	Mexique
Dhaka	23°44'	-90°27'	Bangladesh
La Havane	23°11'	82°24'	Cuba
Mascate	23°37'	-58°33'	Oman

Figure III.17

La latitude de 23°26' correspond au tropique du cancer.

On peut constater qu'au solstice d'été (courbe 11), à midi solaire (12 h TSV), le soleil se trouve au zénith. Il n'y a pas d'ombre portée.

Le diagramme relatif aux lieux situés sur le tropique du capricorne (latitude de -23°26') se déduit de celui du cancer par simple retournement mais en inversant le numéro des courbes (la courbe 1 devient 11, la courbe 2 devient 10, etc).



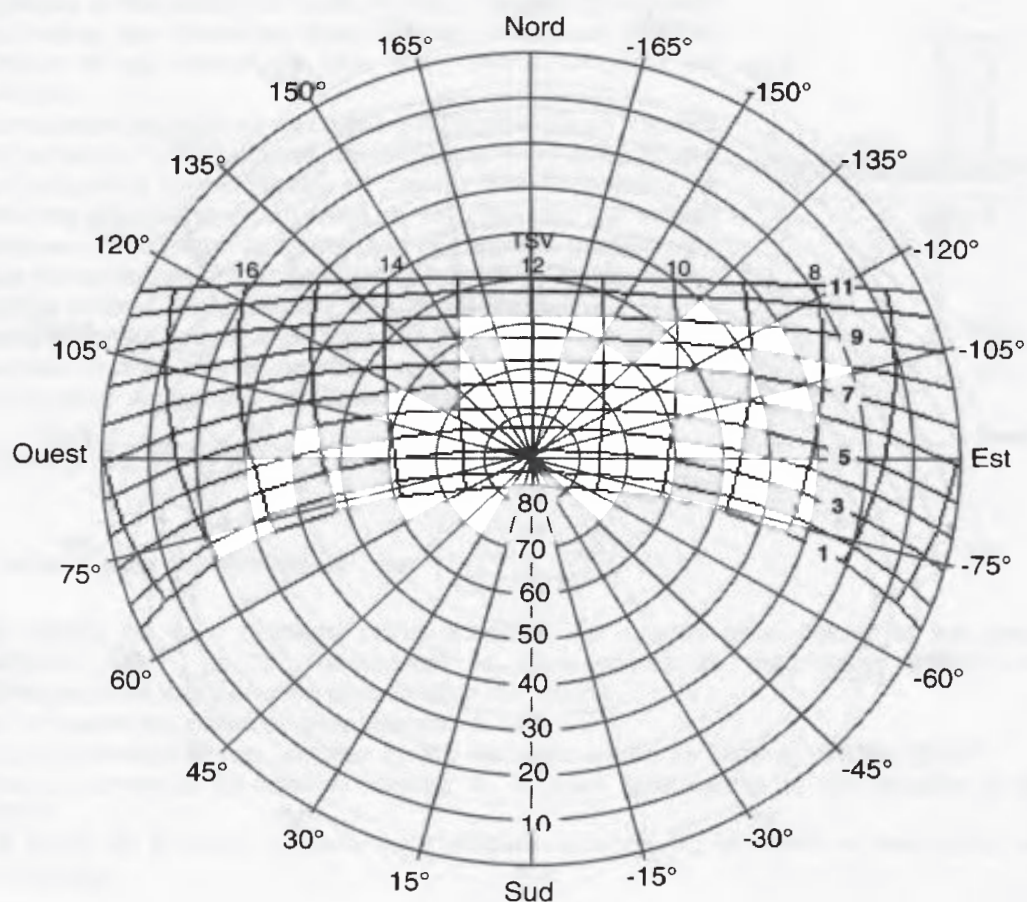
latitude 0°23'			
lieu	latitude	longitude	pays
Kampala	0°20'	-32°33'	Ouganda
Libreville	0°23'	-9°27'	Gabon
Macapá	0°05'	51°04'	Brésil (Amapá)
Pontianak	0°00'	-109°19'	Indonésie
Quito	-0°10'	78°29'	Équateur

Figure III.18

Pour un lieu situé à l'équateur, il vaut mieux installer un capteur solaire à l'horizontale de façon à récupérer l'énergie solaire tout au long de l'année. Le soleil passe en effet du nord au sud et se trouve au zénith aux équinoxes à midi solaire.

Remarquons la durée pratiquement constante des jours

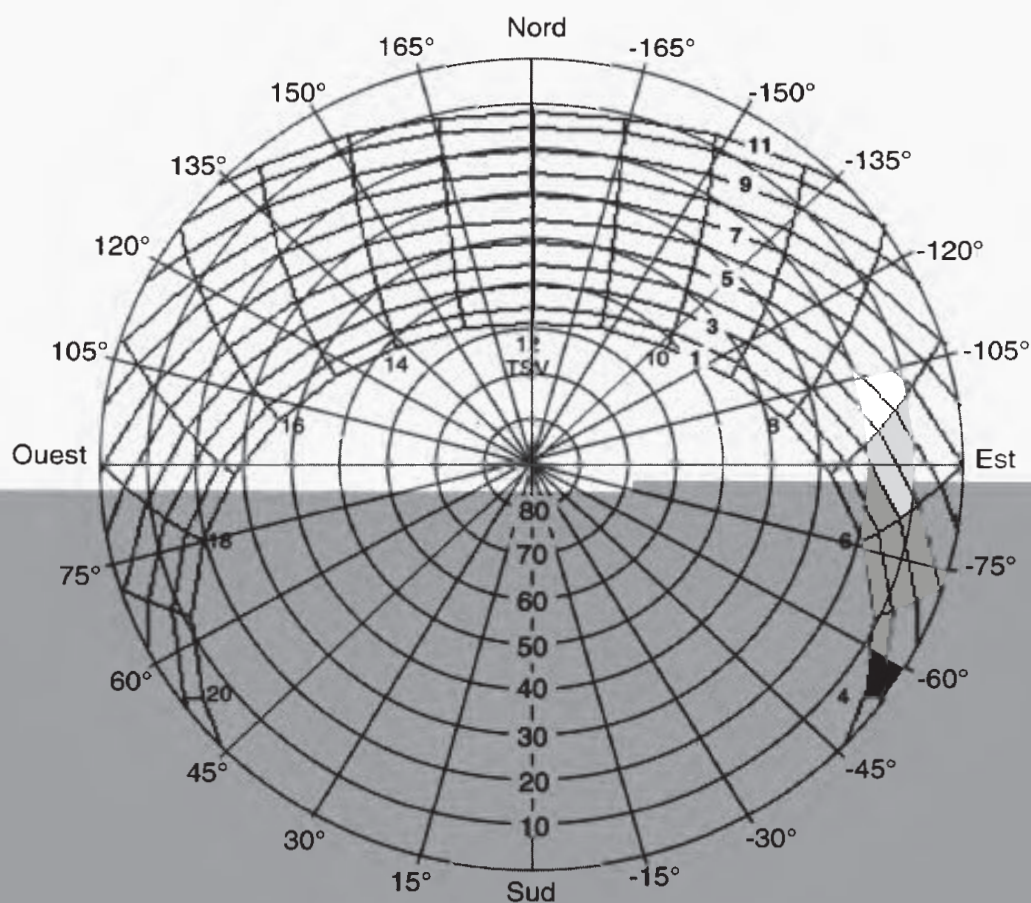
$$ddj = 18 - 6 = 12 \text{ h.}$$



latitude - 17°32'			
lieu	latitude	longitude	pays
Antananarivo	-18°55'	-47°31'	Madagascar
Harare	-17°48'	-31°01'	Zimbabwe
La Paz	-16°28'	68°09'	Bolivie
Oshakati	-17°46'	-15°41'	Namibie
Papeete	-17°32'	149°34'	Tahiti (F)
Santa Cruz	-17°46'	63°14'	Bolivie

Figure III.19

Dans l'hémisphère sud, on voit que la durée du jour est la plus courte au solstice d'été de l'hémisphère boréal (le 21 juin) alors que la journée la plus longue est le 21 décembre.



latitude - 54°48'			
lieu	latitude	longitude	pays
île Bouvet	-54°25'	-3°24'	Norvège
île Heard	-53°00'	-73°00'	Australie
île Macquarie	-54°29'	-158°57'	Australie
îles Sandwich du sud	-54°30'	36°00'	Grande-Bretagne
Ushuaia	-54°48'	68°18'	Argentine

Figure III.20

Le diagramme solaire pour la ville la plus au sud, Ushuaia en Argentine, montre que la durée du jour est limitée à 7 h environ le 21 juin alors qu'elle est de 17 h le 21 décembre.

Ce diagramme correspond (en inversé) à celui que l'on peut tracer pour des lieux de l'hémisphère nord ayant une latitude de 54°48', soit, par exemple Belfast (54°36') en Irlande du Nord ou Gdansk (54°22') en Pologne.

* Application III.6

Le diagramme solaire permet d'avoir une idée rapide des périodes d'ensoleillement d'un capteur. Il suffit d'y reporter les limites des obstacles éventuels qui entourent le point d'étude et qui créent ce que l'on nomme un *effet de masque*.

Considérons le schéma ci-contre qui représente un capteur élémentaire P placé devant un immeuble situé à Toulouse. Les longueurs sont données en mètres. Pour connaître les périodes d'occultation du soleil, il faut reporter les angles extrêmes définissant la dimension horizontale du bâtiment puis de construire la courbe caractéristique de sa hauteur

L'angle limite à l'est s'élève à $\tan^{-1}(18/27)=33,7^\circ$

L'angle limite à l'ouest vaut $\tan^{-1}(11/27)=22^\circ$

La hauteur angulaire au méridien vaut $\tan^{-1}(20/27)=36,5^\circ$

La hauteur angulaire mesurée dans le méridien $-33,7^\circ$

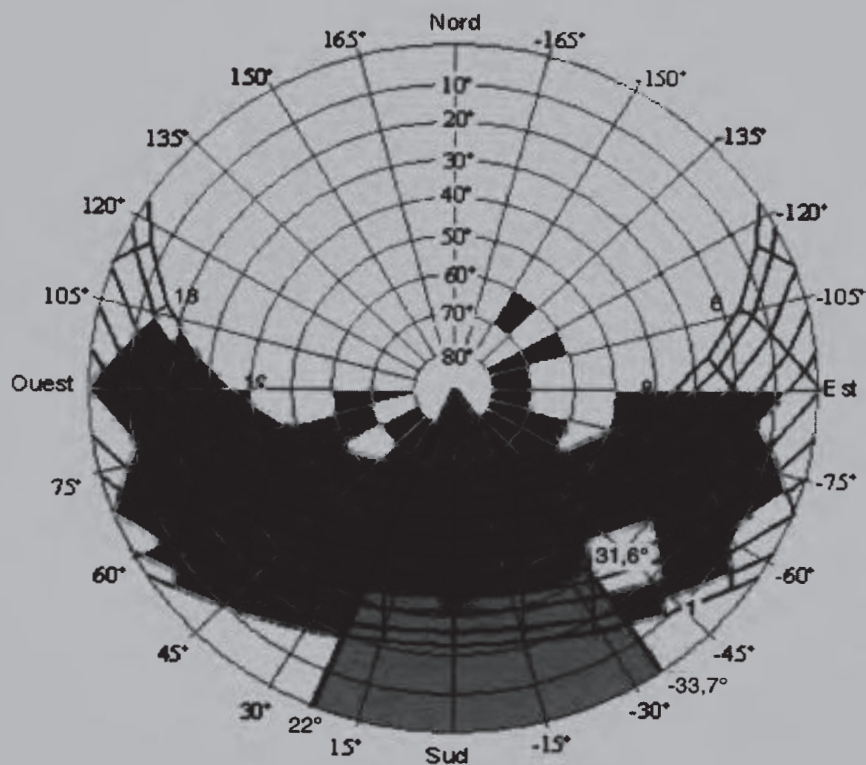
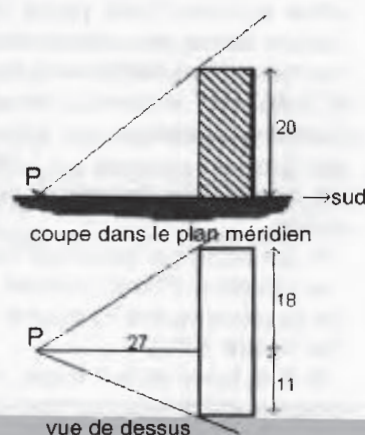
s'élève à $\tan^{-1}\left(\frac{20}{\sqrt{27^2 + 18^2}}\right)=31,6^\circ$

et dans le plan du méridien 22° , $\tan^{-1}\left(\frac{20}{\sqrt{27^2 + 11^2}}\right)=34,5^\circ$

On rejoint les trois derniers points calculés. La courbe ainsi tracée et les deux rayons vecteurs, $-33,7^\circ$ et 22° définissent la zone grisée du diagramme solaire ci-dessous correspondant aux périodes d'occultation du soleil.

On en déduit les périodes d'occultation du soleil

- pour le solstice d'hiver (courbe 1), le soleil sera caché de 9h40 environ à 13h30.
- les 23 février et 20 octobre (courbe 4), le soleil sera caché de 10h environ et ce jusqu'à 13h15.
- à partir du 8 mars et jusqu'au 6 octobre (courbe 5), le soleil ne sera plus caché par l'immeuble.



Considérons à présent le cas où l'on cherche les périodes pendant lesquelles un point P situé au fond d'une pièce d'une maison toulousaine, sera éclairé par le soleil. Le schéma ci-contre donne les caractéristiques géométriques du problème.

La zone d'ensoleillement est délimitée par deux azimuts

$90^\circ - 40^\circ = 50^\circ$ et bien sûr le symétrique -50°

Quant à la hauteur elle varie entre 50° (à midi TSV) et

$\tan^{-1}(\tan 50^\circ \times \sin 40^\circ) = 37,5^\circ$

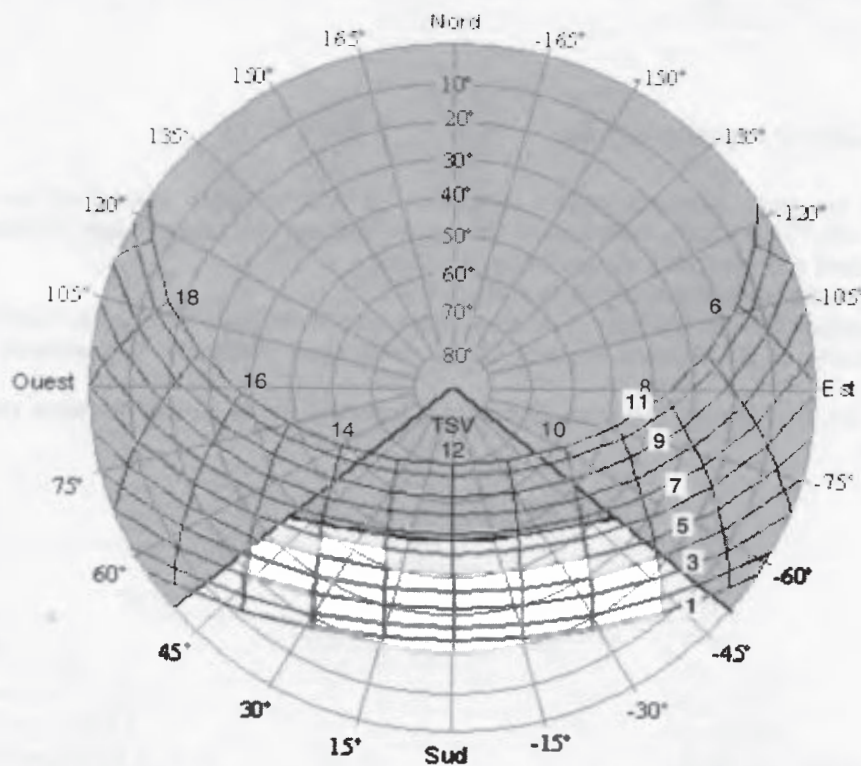
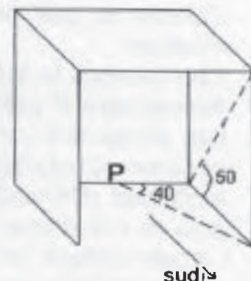
La zone claire fournit la période d'ensoleillement du fond de la pièce.

On constate par exemple que

- au solstice d'hiver (courbe 1), le soleil éclairera le milieu du fond de la pièce (point P) à partir de 8h15 environ et ce jusqu'à 15h45 (en heure TSV).

- le 6 octobre et le 8 mars, courbe 5, le soleil entrera dans la pièce à 9h05 et en sortira vers 14h55.

- à partir du 3 avril et jusqu'au 10 septembre (courbe 7), le soleil n'éclairera pas le point P



Capteurs solaires à Romans dans la Drôme.

3. ÉCLAIREMENT SOLAIRE

L'éclairement correspond à la puissance solaire reçue par une surface plane élémentaire, appelée capteur. On distingue l'éclairement dû aux rayons solaires directs et celui dû au rayonnement solaire diffusé par le ciel ou réfléchi par une surface (le sol, un mur ...) Cet éclairement dépend bien sûr de l'orientation de la surface par rapport au soleil. Les grandeurs seront calculées en W/m^2 et seront notées avec un astérisque "*".

3.1 Éclairement direct $S^*(i, \gamma)$

Considérons un capteur élémentaire incliné d'un angle i par rapport à l'horizontale et orienté d'un angle γ par rapport au Sud. L'éclairement direct S^* est la composante, normale au capteur, de l'éclairement solaire I^* .

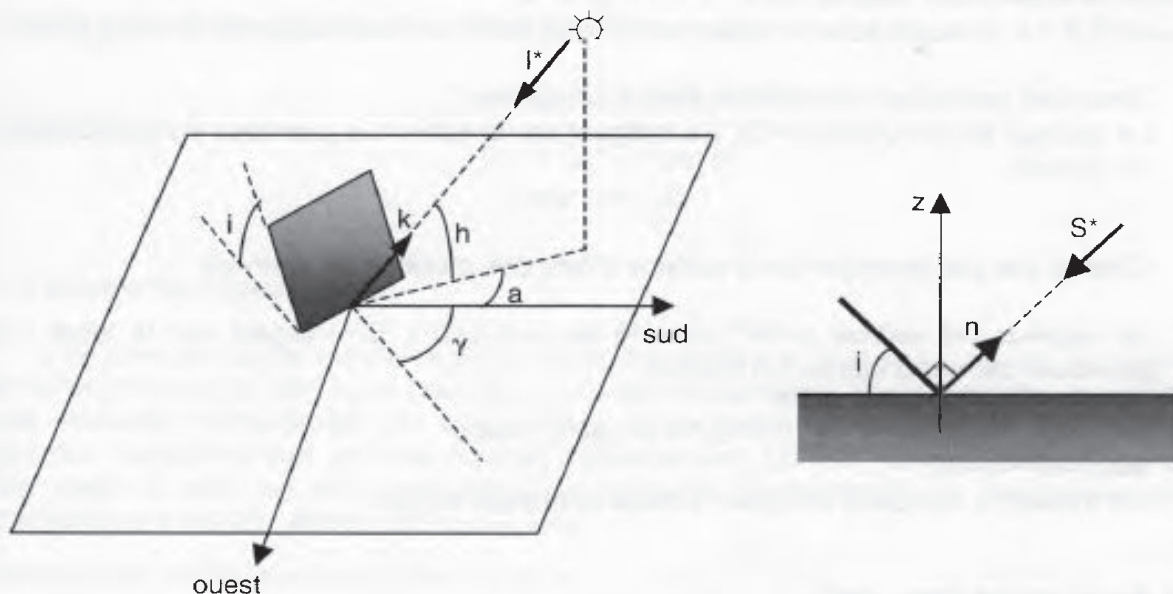


Figure III.21 – Définition des angles pour une surface plane élémentaire éclairée par le soleil

* Application III.7

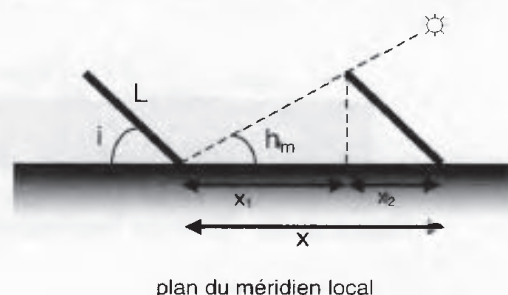
Si l'on veut installer plusieurs rangées parallèles de capteurs plans, il faut s'assurer que chacune d'entre elles ne vient pas masquer l'ensoleillement d'une autre. Cela peut se traduire par une distance minimale à respecter entre deux rangées, distance fonction de la géométrie des capteurs (longueur L , inclinaison i , orientation γ) et de la position du soleil (a , h).

Considérons le cas simple du soleil à midi solaire, c'est-à-dire situé dans le plan du méridien local $a=0$, $h=h_m$. Les capteurs sont orientés plein sud $\gamma=0$. La distance minimale à respecter pour que chacun d'entre eux ne gêne pas le suivant s'écrit

$$x = x_1 + x_2 = \frac{L \sin i}{\tan h_m} + L \cos i$$

d'où

$$x = L \left(\frac{\sin i}{\tan h_m} + \cos i \right)$$



plan du méridien local

On peut écrire

$$S^* = I^* \vec{k} \cdot \vec{n}$$

où \vec{n} représente le vecteur unitaire normal à la surface élémentaire

$$\vec{n} (\sin \gamma \sin i, \cos \gamma \sin i, \cos i)$$

et \vec{k} le vecteur unitaire donnant la direction du soleil

$$\vec{k} (\cos h \sin a, \cos h \cos a, \sin h)$$

d'où il vient

$$S^*(i, \gamma) = I^* [\sin i \cos h \cos(a - \gamma) + \cos i \sin h]$$

On peut remarquer que la surface n'est ensoleillée que si l'inégalité suivante est vérifiée $\vec{k} \cdot \vec{n} > 0$, d'où $S^* > 0$.

Quand la lumière est rasante on a $\vec{k} \cdot \vec{n} = 0$ et $S^* = 0$.

Quand $\vec{k} \cdot \vec{n} < 0$, le soleil éclaire inutilement le dos de la surface réceptrice et l'on a $S^* = 0$.

Deux cas particuliers importants sont à considérer

- Le capteur est horizontal ($i=0$). En indiquant par la lettre h la grandeur correspondante, on obtient

$$S_h^* = I^* \sin h.$$

C'est le cas par exemple de la surface d'eau des piscines de plein air

- Le capteur est vertical ($i=90^\circ$) orienté au sud ($\gamma=0^\circ$). En indiquant par la lettre v la grandeur correspondante, on obtient

$$S_v^* = I^* \cos h \cos a$$

avec $-90^\circ < a < 90^\circ$

On trouve ce cas dans les baies vitrées orientées au sud.

3.2 Éclairement diffus $D^*(i)$

Dans ce paragraphe on suppose que le rayonnement diffus provenant du ciel ou bien du sol est isotrope. De plus on considère que le sol est horizontal.

Lorsque le capteur est horizontal ($i=0^\circ$) il reçoit le rayonnement diffusé par le ciel soit D_h^*

S'il est incliné d'un angle i , il "voit" moins de ciel mais par contre reçoit du sol une fraction de la quantité $a^* \cdot G_h^*$ où a^* est l'albédo du sol pour le rayonnement solaire.

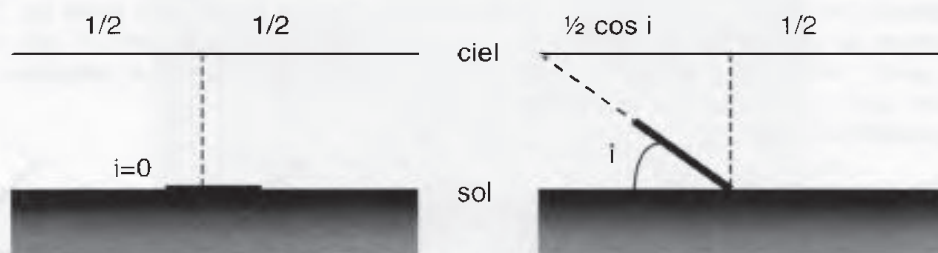


Figure III.22 – Effet de l'inclinaison i sur la réception du rayonnement diffus.

La figure ci-dessus montre que la fraction de D_h^* reçue par le capteur en provenance du ciel s'écrit

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos i = \frac{1}{2} (1 + \cos i)$$

Quant à la fraction de $(a^* \cdot G_h^*)$ en provenance du sol, elle s'écrit

$$1 - \frac{1}{2} (1 + \cos i) = \frac{1}{2} (1 - \cos i).$$

Finalement on obtient

$$D^*(i) = \left(\frac{1 + \cos i}{2} \right) D_h^* + \left(\frac{1 - \cos i}{2} \right) a^* G_h^*$$

3.3 Éclairement global $G^*(i, \gamma)$

C'est la somme des éclairagements direct et diffus

$$G^* = S^* + D^*$$

On en tire:

$$D_h^* = G_h^* - I^* \sin h$$

3.4 Rapports d'éclairement

Les mesures expérimentales de l'éclairement solaire sont le plus souvent, comme on le verra par la suite, obtenues pour des surfaces horizontales. Pour connaître, à partir de ces mesures, l'éclairement sur une surface d'orientation quelconque, on introduit une quantité caractéristique appelée rapport d'éclairement. En fait, compte tenu de ce que l'on vient de voir, on fait apparaître trois rapports d'éclairement en fonction du type d'éclairement étudié direct, diffus ou global.

Dans le cas de l'éclairement direct, on pose

$$R_s = \frac{S^*(i, \gamma)}{S_h^*}$$

De même on pose pour l'éclairement diffus

$$R_D = \frac{D^*(i)}{D_h^*}$$

et, pour l'éclairement global

$$R_G = \frac{G^*(i, \gamma)}{G_h^*}$$

Ces définitions amènent aux résultats suivants

$$R_s = \frac{\sin i \cos(a - \gamma)}{\tan h} + \cos i$$

$$R_D = \left(\frac{1 + \cos i}{2} \right) + \left(\frac{1 - \cos i}{2} \right) a^* \frac{G_h^*}{D_h^*}$$

$$R_G = \left(R_s - \frac{1 + \cos i}{2} \right) \frac{S_h^*}{G_h^*} + \frac{1 + \cos i}{2} + \left(\frac{1 - \cos i}{2} \right) a^*$$

Remarque si le calcul donne $R_s < 0$, alors prendre $R_s = 0$ dans les calculs. Ceci peut se produire si le soleil se trouve "derrière" le capteur, par exemple au solstice d'été, à Toulouse, au lever du soleil, le capteur étant vertical et orienté plein sud. Dans ce cas le produit scalaire $\vec{k} \cdot \vec{n}$ est négatif comme on l'a vu au §3.1

* Application III.8

Calculons les rapports d'éclairement, le 6 février à midi solaire, dans le cas d'un capteur plan incliné de 50° par rapport à l'horizontale et orienté de 10° vers l'ouest. Ce capteur est situé à Biarritz ($\varphi = 43^\circ 28'$).

On a donc $i = 50^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\varphi = 43,5^\circ$, $a = 0$, $h = h_m$.

L'albédo solaire vaut $a^* = 0,3$.

Des mesures effectuées à midi solaire ont fournies les valeurs suivantes

- éclairement global sur un plan horizontal $G_h^* = 471 \text{ W/m}^2$

- éclairement diffus sur un plan horizontal $D_h^* = 92 \text{ W/m}^2$

On calcule tout d'abord

le numéro du jour $n = 37$

la déclinaison $\delta = -16,1^\circ$

la hauteur $h_m = 30,4^\circ$

- Calcul du rapport d'éclairement direct R_s

En appliquant directement la formule correspondante, on trouve

$$R_s = \frac{\sin 50^\circ \times \cos(0^\circ - 10^\circ)}{\tan 30,4^\circ} + \cos 50^\circ = 1,93.$$

En inclinant le capteur on capte mieux le rayonnement solaire direct dans notre cas le gain est de 93% par rapport à ce que l'on recevrait si le capteur était en position horizontale.

- Calcul du rapport d'éclairement diffus R_D

On applique directement la formule

$$R_D = \left(\frac{1 + \cos 50^\circ}{2} \right) + \left(\frac{1 - \cos 50^\circ}{2} \right) \times 0,3 \times \frac{471}{92} = 1,1$$

- Calcul du rapport d'éclairement global R_G

On calcule tout d'abord $S_h^* = G_h^* - D_h^* = 471 - 92 = 379 \text{ W/m}^2$

On applique alors la formule

$$R_G = \left(1,93 - \frac{1 + \cos 50^\circ}{2} \right) \times \frac{379}{471} + \left(\frac{1 + \cos 50^\circ}{2} \right) + \left(\frac{1 - \cos 50^\circ}{2} \right) \times 0,3 = 1,77$$

Incliner le capteur de 50° permet de gagner à midi solaire, 77% de mieux d'énergie solaire globale par rapport à la position horizontale.

Dans la pratique, pour que les rapports d'éclairement soient les plus élevés possibles, on incline le capteur d'un angle proche de la latitude du lieu ($i \approx \varphi$). On verra cependant (cf. chapitre V) qu'il existe une plage d'inclinaisons, autour de la position $i = \varphi$, suffisamment large pour permettre une installation aisée sur une surface existante (toiture, talus...)



4. IRRADIATION SOLAIRE

On s'intéresse à présent à l'énergie tombant sur une surface donnée. Les quantités qui suivent seront, en général, exprimées en kWh/m² de surface réceptrice.

4.1 Irradiation hors atmosphère

En déterminant l'irradiation hors atmosphère, on élimine le problème climatologique qui tient compte du lieu d'étude, de la saison et de la nébulosité du ciel. De nombreuses mesures météorologiques ont permis d'établir des formules empiriques exprimant l'irradiation au sol à partir de l'irradiation hors atmosphère.

Considérons un plan horizontal, à la limite de l'atmosphère terrestre, situé à une latitude φ . Notons C_h^* l'éclairement solaire correspondant. On a

$$C_h^* = C^* \sin h$$

où C^* représente la constante solaire que l'on peut considérer constante compte tenu de sa faible variation au cours du temps.

Notons C_h l'irradiation journalière.

On a

$$C_h = \int_{\text{journée}} C_h^* dt = \int_{LS}^{CS} C^* \sin h dt$$

où LS et CS correspondent aux heures de lever et coucher du soleil.

En remplaçant $\sin h$ par son expression donnée au paragraphe 1 1, on a

$$C_h = C^* \int_{LS}^{CS} (\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \omega \cdot \cos \delta \cdot \cos \varphi) dt$$

Pour une journée et un lieu donné, δ et φ sont fixés. D'autre part, 1 heure de temps correspond à une variation de 15° de l'angle horaire ω

$$dt = \frac{12}{\pi} d\omega$$

avec le temps t en heures et l'angle ω en radians. L'intégration donne alors

$$C_h = \frac{24}{\pi} \frac{C^*}{1000} (\sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \omega_0 + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \omega_0)$$

avec C_h en kWh/m².j et $C^*=1353$ W/m²

Une autre expression peut être écrite en considérant la durée du jour en heures et ω_0 en radians

$$ddj = \frac{24 \omega_0}{\pi}$$

Les fonctions circulaires étant calculées avec les angles en degrés, on obtient

$$C_h = \frac{C^*}{10^3} \left[\sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot ddj + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \frac{24}{\pi} \cdot \sin(7,5 \cdot ddj) \right]$$

* Application III.9

Déterminons l'irradiation solaire horizontale, hors atmosphère pour le 15 mars (n=74) à la latitude de Rennes ($\varphi=48^{\circ}04'=48,07^{\circ}$).

Au tableau III.1.2, on lit $\delta=-2,8^{\circ}$

L'angle horaire au coucher ω_0 est donné par

$$\omega_0 = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) = \cos^{-1}[-\tan(48,07^{\circ}) \times \tan(-2,8^{\circ})] = 86,9^{\circ}$$

d'où la durée du jour $ddj = 2 \times 86,9/15 = 11,58$ h.

Finalement

$$C_h = \frac{1353}{1000} \left[\sin(-2,8^{\circ}) \sin(48,07^{\circ}) \times 11,58 + \cos(-2,8^{\circ}) \cdot \cos(48,07^{\circ}) \cdot \frac{24}{\pi} \sin(7,5 \times 11,58) \right]$$

$$C_h = 6,32 \text{ kWh/m}^2$$

reçus durant la journée du 15 mars, sur une surface horizontale à la limite de l'atmosphère.

4.2 Cas d'un ciel clair

Dans le cas où aucun nuage ne vient perturber le rayonnement solaire, on peut calculer aisément l'irradiation journalière en intégrant l'éclairement reçu tout au long de la journée, c'est-à-dire sur la durée ddj . Les quantités relatives à un ciel clair seront indicées par "o".

L'irradiation globale par ciel clair, reçue par un plan horizontal, sera notée G_{oh} et calculée en écrivant

$$G_{oh} = \int_{LS}^{CS} G_h^* dt$$

où LS représente l'heure de lever du soleil et CS son heure de coucher

Dans le cas d'une surface quelconque, on aura

$$G_o(i, \gamma) = \int_{LS}^{CS} G^*(i, \gamma) dt = \int_{LS}^{CS} R_G(i, \gamma) \cdot G_h^* dt$$

Il ne faut pas oublier que dans cette dernière relation, le calcul du rapport d'éclairement global R_G nécessite la connaissance du rapport d'éclairement direct R_s . Or celui-ci peut devenir négatif selon l'heure considérée et l'orientation (inclinaison i et azimuth γ) du capteur. Dans ce cas, R_s est pris égal à zéro, sinon cela reviendrait, dans le bilan, à retrancher de l'énergie non reçue par le capteur¹.

Si on connaît l'éclairement global à midi solaire sur un plan horizontal G_{hm}^* , on peut approcher la valeur de l'irradiation par ciel clair G_{oh} en considérant que l'évolution de l'éclairement G_h^* est sinusoïdale sur la durée du jour ddj

$$G_h^* = G_{hm}^* \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{ddj}\right)$$

avec le temps t en heures. On a donc

$$G_{oh} = \int_0^{ddj} G_{hm}^* \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{ddj}\right) dt$$

¹ En réalité cette énergie "négative" est bien reçue par le capteur mais sur sa face arrière que l'on considère généralement comme un élément ne participant pas à la captation utile de l'énergie solaire.

Et après intégration

$$G_{oh} = \frac{2}{\pi} ddj \cdot G_{hm}^*$$

Il est beaucoup plus hasardeux d'étendre ce raisonnement à l'irradiation sur un plan quelconque car la durée d'insolation ne correspond plus nécessairement à la durée du jour ddj . Elle est bornée par cette valeur qui est un maximum. Si le capteur est vertical et orienté plein ouest, par exemple, il est évident qu'il ne sera ensoleillé que la moitié de la journée. On ne peut donc intégrer simplement sur la durée ddj .

4.3 Cas d'un ciel variable

Seul un grand nombre de mesures locales peuvent permettre de prédire, avec une bonne approximation, l'énergie solaire qui pourra être récupérée en un lieu donné.

La durée d'ensoleillement, appelée *durée d'insolation* ddi , est un premier paramètre. On la caractérise par le *facteur d'éclairement* σ . Celui-ci est égal au rapport de la durée d'insolation sur la durée du jour. On a donc par définition

$$\sigma = \frac{ddi}{ddj}$$

Mais l'énergie solaire reçue par une surface n'est pas seulement fonction de la durée d'insolation; en effet il faut tenir compte de l'heure d'éclairement. Une heure d'ensoleillement à midi sera plus intéressante sur le plan énergétique que la même durée à 9 heures du matin. On introduit alors un nouveau facteur appelé *facteur d'irradiation* e , correspondant au rapport de l'énergie réellement reçue sur l'énergie qu'aurait reçue le capteur par ciel clair. On peut donc écrire finalement

$$G(i, \gamma) = e \cdot G_o(i, \gamma)$$

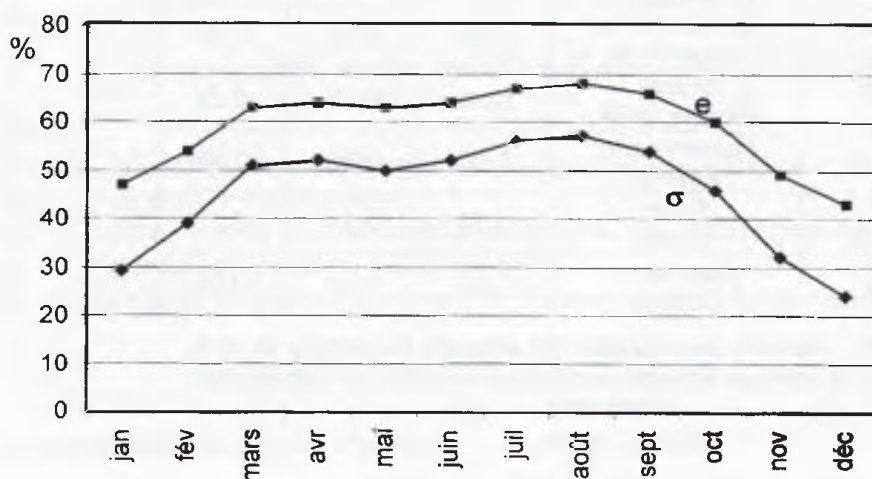


Figure III.23 –
Évolution sur l'année
des facteurs
d'éclairement σ et
d'irradiation e pour
Toulouse.

Une autre approche consiste à utiliser une formule empirique de la forme

$$G_h = C_h (a_1 + a_2 \cdot \sigma)$$

dans laquelle C_h est l'irradiation de la surface horizontale placée à la limite de l'atmosphère, σ le facteur d'éclairement et a_1 et a_2 deux coefficients dépendants de la climatologie locale. Bien sûr, C_h , σ , a_1 et a_2 dépendent de la période d'étude la journée, le mois ou l'année.

Le calcul de C_h a été vu au paragraphe 4.1

Les paramètres σ , a_1 et a_2 variant nécessairement d'un site à l'autre il est nécessaire de se renseigner auprès des services météorologiques susceptibles de fournir ces indications. Un grand nombre de relevés journaliers permet de définir des valeurs moyennées sur le mois ou l'année. On a essayé de caractériser ces valeurs annuelles par la climatologie du lieu climat méditerranéen, continental, équatorial,...

Le tableau III.5 donne les valeurs moyennes annuelles de σ , a_1 et a_2 pour quelques villes en fonction du type de climat.

Cependant la transposition des valeurs d'un site à un autre est à faire avec précaution. Sous un même climat deux sites peuvent présenter un ensoleillement très différent, compte tenu de la végétation ou bien d'un microclimat. C'est le cas par exemple du couple de villes Athènes et Nice bien que faisant partie du même climat méditerranéen. Il apparaît que Nice est beaucoup plus ensoleillée ($\sigma=0,61$) qu'Athènes ($\sigma=0,38$).

climat	exemple de lieu possédant ce climat	σ	a_1	a_2
		valeurs moyennes annuelles		
méditerranéen	Athènes (Grèce)	0,38	0,20	0,51
méditerranéen	Nice (France)	0,62	0,17	0,63
continental humide	Atlanta (Géorgie, USA)	0,59	0,38	0,26
tempéré semi-aride	Albuquerque (USA)	0,78	0,41	0,37
tempéré océanique	Casablanca (Maroc)	0,68	0,22	0,55
froid humide	Hambourg (Allemagne)	0,36	0,22	0,57
subtropical humide	Buenos Aires (Argentine)	0,59	0,26	0,50
subtropical humide	Miami (Floride, USA)	0,65	0,42	0,22
aride chaud	Tamanrasset (Algérie)	0,83	0,30	0,43
tropical à moussons	Pune (Inde)	0,37	0,30	0,51
équatorial	Kisangani (Zaïre)	0,48	0,28	0,39

Tableau III.5 – Valeurs des coefficients annuels moyens σ , a_1 et a_2 entrant dans la formule empirique donnant l'irradiation sur un plan horizontal

$$G_h = C_h (a_1 + a_2 \cdot \sigma)$$

* Application III.10

Déterminons l'énergie solaire susceptible d'être récupérée annuellement à Casablanca ($\varphi=33^\circ 39'$) sur un plan horizontal.

Utilisons pour cela la méthode de la régression linéaire $G_h = C_h (a_1 + a_2 \cdot \sigma)$.

On calcule pour commencer l'énergie récupérable, hors atmosphère, le 15 de chaque mois. En multipliant par le nombre de jours du mois on obtient l'énergie mensuelle susceptible d'être recueillie. La somme de ces énergies donne l'énergie annuelle récupérable. Les résultats des calculs sont donnés au tableau ci-dessous.

mois	n	δ (°)	ω_0	ddj	C_h kWh/m ² par jour	C_h kWh/m ² par mois
janvier	15	-21,3	75,0	10,00	5,025	155,8
février	46	-13,3	81,0	10,79	6,409	179,5
mars	74	-2,8	88,1	11,75	8,156	252,8
avril	105	9,4	96,3	12,84	10,012	300,4
mai	135	18,8	103,1	13,75	11,254	348,9
juin	166	23,3	106,7	14,22	11,790	353,7
juillet	196	21,5	105,2	14,03	11,582	359,0
août	227	13,8	99,4	13,25	10,612	329,0
septembre	258	2,2	91,5	12,20	8,949	268,5
octobre	288	-9,6	83,5	11,14	7,037	218,2
novembre	319	-19,1	76,6	10,22	5,395	161,9
décembre	349	-23,3	73,3	9,77	4,665	144,6
année						3072,1

Pour Casablanca, on lit dans le tableau III.5 $\sigma=0,68$, $a_1=0,22$ et $a_2=0,55$.

$G_h = 3072,1 \times (0,22 + 0,55 \times 0,68) = 1825 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$.

Pour déterminer l'irradiation sur un plan incliné d'orientation (i, γ), pour une journée donnée, on utilise une loi empirique qui indique que *le rapport des irradiances d'un plan incliné et d'un plan horizontal mesuré hors atmosphère est égal au rapport des mêmes quantités mesurées au niveau du sol*

$$\frac{C(i, \gamma)}{C_h} = \frac{G(i, \gamma)}{G_h}$$

ce qui donne

$$G(i, \gamma) = (a_1 + a_2 \cdot \sigma) C(i, \gamma)$$

où

$$C(i, \gamma) = \int_{ddj} C^*(i, \gamma) dt = \int_{ddj} R_s C_h^* dt = \int_{ddj} R_s C^* \sinh dt$$

avec

$C^*(i, \gamma)$ éclairement solaire hors atmosphère d'une surface d'orientation (i, γ)

R_s rapport d'éclairement

C_h^* éclairement solaire hors atmosphère d'un plan horizontal

C^* constante solaire ($1,353 \text{ kW/m}^2$).

En remplaçant R_s par son expression donnée au § 3.4, on obtient

$$C(i, \gamma) = C^* \sin i \int_{ddj} \cos(a - \gamma) \cosh dt + \cos i \int_{ddj} C^* \sinh dt$$

La trigonométrie permet d'écrire

$$\cos(a - \gamma) = \cos a \cos \gamma + \sin a \sin \gamma$$

et en utilisant les formules de Gauss vues au § 1.1, on peut mettre la première intégrale sous la forme

$$\int_{ddj} \cos(a - \gamma) \cosh dt =$$

$$\cos \gamma \cos \delta \sin \phi \int_{ddj} \cos \omega dt - \cos \gamma \sin \delta \cos \phi \int_{ddj} dt + \cos \delta \sin \gamma \int_{ddj} \sin \omega dt$$

ou encore, en notant que $dt = \frac{12}{\pi} d\omega$ (t en heures et ω en radians)

$$\int_{ddj} \cos(a - \gamma) \cosh dt = \cos \gamma \cos \delta \sin \phi \frac{24}{\pi} \sin \omega_0 - \cos \gamma \sin \delta \cos \phi \frac{24}{\pi} \omega_0$$

D'autre part, on a vu que

$$\int_{ddj} C^* \sinh dt = C_h$$

Finalement, il vient

$$C(i, \gamma) = C^* \frac{24}{\pi} \sin i \cos \gamma (\cos \delta \sin \phi \sin \omega_0 - \sin \delta \cos \phi \omega_0) + \cos i C_h$$

Attention ce résultat n'est applicable que pour de faibles valeurs de l'orientation azimutale, soit $-10^\circ < \gamma < 10^\circ$

* Application III.11

Soit à déterminer l'irradiation solaire $G(i, \gamma)$, pour la journée du 15 avril, d'une surface plane située à Casablanca, avec les conditions d'orientation suivante

inclinaison $i = \varphi = 33^\circ 39' = 33,65^\circ$

azimut $\gamma = 0$

La date du 15 avril donne

$\delta = 9,4^\circ$

$\omega_0 = 96,3^\circ = 1,681 \text{ rad.}$

La valeur de C_h a été obtenue à l'application précédente $C_h = 10,012 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{j.}$

La formule s'écrit

$$C(i, \gamma) = 1,353 \times 24 / \pi \times \sin 33,65^\circ (\cos 9,4^\circ \times \sin 33,65^\circ \times \sin 96,3^\circ - \sin 9,4^\circ \times \cos 33,65^\circ \times 1,681) + \cos 33,65^\circ \times 10,012 = 10,138 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{j.}$$

Il vient $G(i, \gamma) = (0,22 + 0,55 \times 0,68) \times 10,138 = 6,022 \text{ kWh/m}^2$

4.4 Instruments de mesure

Le rayonnement solaire direct I^* est mesuré en visant le soleil avec un *pyrhéliomètre* (cf. fig.III.24). Celui-ci peut être muni de filtres, ce qui permet de mesurer l'énergie reçue dans certaines bandes spectrales.

Le rayonnement global G^* est mesuré par un *pyranomètre* (cf. fig.III.25). Un courant électrique, proportionnel à l'éclairement reçu, est fourni par une thermopile¹ protégée par deux hémisphères en verre et par un disque métallique recouvert de peinture blanche. Le verre est transparent aux longueurs d'onde comprises dans la bande spectrale (0,3–2,5 μm). L'appareil, monté horizontalement grâce à un niveau à bulle, donne la valeur de l'éclairement global G_h^*



Figure III.24 – Pyrhéliomètre permettant la mesure du rayonnement solaire direct I^*

¹ Une thermopile est constituée d'un ensemble de thermocouples qui, chauffés par le rayonnement solaire, fournissent une différence de potentiel à leurs bornes. L'intérêt d'un tel instrument est qu'il est pratiquement indépendant de la longueur d'onde du rayonnement incident contrairement aux systèmes photoélectriques.

L'intégration de cette quantité permet de définir la valeur du facteur d'irradiation e .

Pour mesurer le rayonnement diffus D^* , il suffit de monter sur un pyranomètre une bande venant occulter le rayonnement direct (cf. fig. III.26).

Figure III.25 – Pyranomètre donnant le rayonnement solaire global
(doc. Kipp & Zonen)



Figure III.26 – Montage permettant la mesure du rayonnement diffus grâce à l'installation d'une bande venant occulter le rayonnement solaire direct.→



En montant deux pyranomètres en opposition, on peut déterminer l'albédo. L'un des pyranomètres est orienté vers le ciel, l'autre étant bien sûr orienté vers le sol. En mesurant la différence des deux signaux fournis par ces deux pyranomètres on en déduit la fraction du rayonnement réfléchi par le sol c'est-à-dire l'albédo de celui-ci.

La durée d'insolation ddi, quant à elle, est mesurée par un *héliographe*, boule de verre qui concentre le rayonnement solaire en un point d'un papier thermosensible. Au fil du temps une trace apparaît. La longueur de cette trace donne la durée d'ensoleillement. Notons toutefois que le seuil de sensibilité du papier est de 120 W/m^2



Figure III.27
Héliographe permettant de mesurer la durée d'insolation

4.5 Résultats des mesures

En France une vingtaine de stations réparties sur le territoire national mesurent l'éclairement solaire global G_n^* reçu par un plan horizontal ainsi que le rayonnement direct I^* et la durée d'insolation ddi. Les résultats obtenus permettent de découper la France en six zones comme indiqué à la figure ci-dessous.

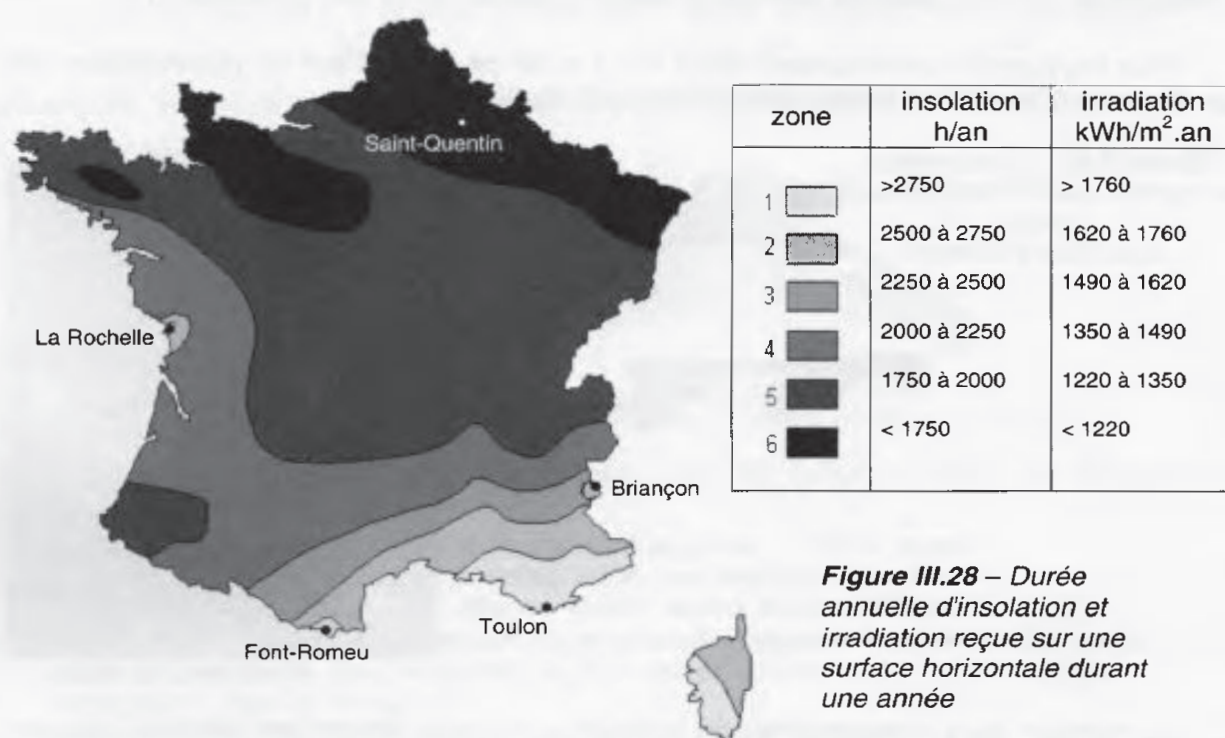


Figure III.28 – Durée annuelle d'insolation et irradiation reçue sur une surface horizontale durant une année

Sur celle-ci on peut relever certaines "anomalies" locales on trouve ainsi un micro-climat ensoleillé en zone 2 (région de Font-Romeu), en zone 3 (le Briançonnais) et en zone 4 (région de La Rochelle). On aperçoit aussi nettement l'influence du Mistral sur la nébulosité et donc l'ensoleillement de la vallée du Rhône.

La ville qui détient le record d'ensoleillement est Toulon (Var) avec 2905 h. La ville la moins ensoleillée est Saint-Quentin (Aisne) avec 1413 h.

Le record mondial de durée d'ensoleillement est le Sahara oriental avec plus de 4300 h.

Le tableau ci-dessous donne pour un ciel clair, c'est-à-dire sans nuage, les éclairagements solaires I^* et G_h^* en France. Les conditions de trouble correspondent à la teneur de l'atmosphère en poussières et autres polluants. Un ciel très pur sera le plus souvent rencontré en montagne et un ciel trouble en agglomération. Ces expressions empiriques ont été obtenues par analyse de nombreuses mesures météorologiques réalisées sur le territoire national (Perrin de Brichambaut). Dans celles-ci la hauteur h du soleil au-dessus de l'horizon doit être exprimée en degrés.

conditions de trouble	I^* W/m ²	G_h^* W/m ²
ciel très pur	$1210 \exp\left(-\frac{1}{6 \sin(h+1)}\right)$	$1130 (\sin h)^{1,15}$
ciel moyennement troublé	$1230 \exp\left(-\frac{1}{3,8 \sin(h+1,6)}\right)$	$1080 (\sin h)^{1,22}$
ciel trouble	$1260 \exp\left(-\frac{1}{2,3 \sin(h+3)}\right)$	$995 (\sin h)^{1,25}$

Tableau III.6 – Expressions empiriques des éclairagements solaires I^* et G_h^* en W/m² en France par ciel clair mais pour trois conditions de trouble. La valeur de la hauteur h du soleil doit être exprimée en degrés.

Deux exemples de relevés de l'éclairement solaire G_h^* au pyranomètre sont donnés ci-dessous, par ciel clair et par ciel couvert. On constate que, par ciel clair, la courbe ressemble à une sinusoïde, comme nous avons pu en faire l'hypothèse précédemment. L'intégration de ces courbes donne l'irradiation G_h .

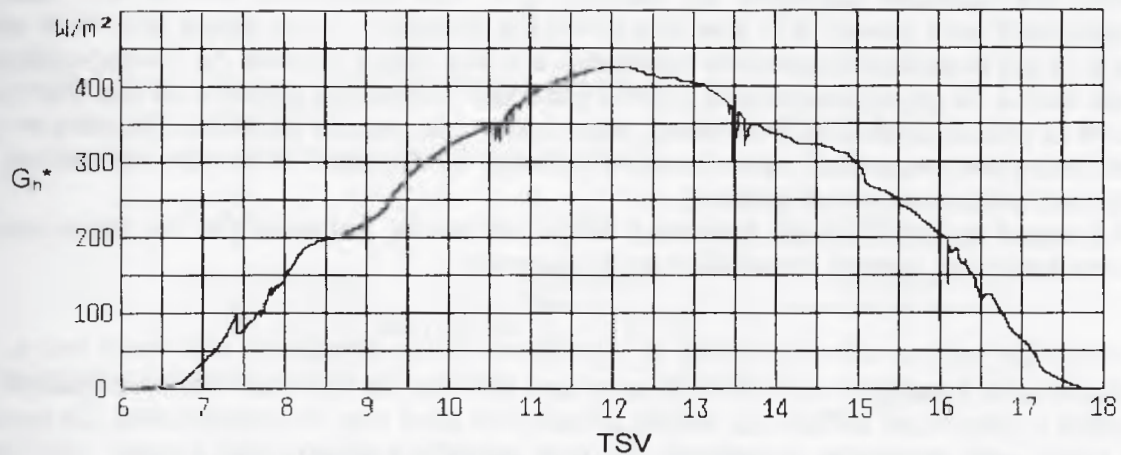


Figure III.29 – Éclairement par ciel clair mesuré au pyranomètre.

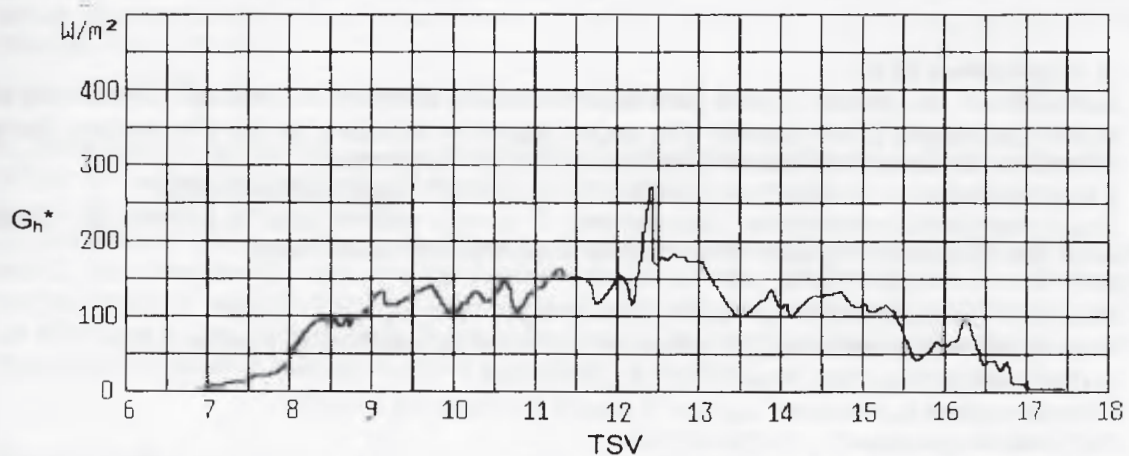


Figure III.30 – Éclairement par ciel couvert mesuré au pyranomètre.

* Application III.12

Dans le cas des figures III.29 et 30, on peut obtenir l'énergie globale reçue en faisant une intégration manuelle, c'est-à-dire en comptant les carreaux délimités par les courbes expérimentales et en multipliant ces nombres par la valeur énergétique d'un carreau.

Dans le cas du ciel clair (fig.III.29) on trouve un nombre de carreaux égal à 112 environ.

Chaque carreau représente une énergie égale à
 $0,5 \text{ (h)} \times 50 \text{ (W/m}^2\text{)} = 25 \text{ Wh/m}^2 = 0,025 \text{ kWh/m}^2$

$G_{0h} = 112 \times 0,025 = 2,8 \text{ kWh/m}^2$

Dans le cas de la journée couverte (fig.III.30), on comptabilise 42 carreaux environ, soit une énergie $G_h = 42 \times 0,025 = 1,05 \text{ kWh/m}^2$

4.6 Méthodes de calcul de l'irradiation

- Sur une journée.

Si l'on cherche l'irradiation d'une surface située en Métropole, on peut commencer par calculer l'éclairement global sur un plan horizontal G_h^* et l'éclairement direct I^* en utilisant les formules données au tableau III.6. On détermine ensuite les rapports d'éclairement pour passer aux grandeurs non horizontales. On en arrive ainsi à la valeur de $G^*(i, \gamma)$ qui peut être considérée constante sur une durée donnée Δt correspondant au pas de calcul. Si on recherche une grande précision, on pourra prendre un pas d'un quart d'heure si l'on dispose d'un ordinateur pour traiter ces calculs répétitifs. Prendre un pas d'une heure est cependant raisonnable et permet de diminuer le nombre de calculs par quatre par rapport au cas précédent.

Le calcul de $G^*(i, \gamma)$ ayant été mené heure par heure, par exemple, on fait la somme des résultats pour obtenir l'irradiation sur la journée

$$G_o(i, \gamma) = \sum_{LS}^{CS} G^*(i, \gamma) \cdot \Delta t$$

Mais cette irradiation est obtenue pour une journée de ciel clair. Ne connaissant pas la météo *a priori* il est difficile de prévoir l'irradiation pour une journée précise. On ne peut que traiter une approche statistique sur une période suffisamment longue, comme le mois ou l'année. Néanmoins, on peut toujours multiplier le résultat obtenu par ciel clair par le facteur d'irradiation e correspondant au mois considéré (cf. tableau III.7). On obtient ainsi l'énergie susceptible d'être obtenue en moyenne par une surface d'orientation (i, γ) tel jour de tel mois.

* Application III.13

Considérons un capteur solaire plan situé à Nice et parallèle à l'axe des pôles, c'est-à-dire incliné par rapport à l'horizontale d'un angle i égal à la latitude φ du lieu (Remarque dans ces conditions, le capteur est perpendiculaire au plan de l'équateur).

L'environnement a un albédo moyen de 0,3. Le ciel est moyennement troublé.

Nous cherchons à déterminer l'éclairement G^* à midi solaire, pour la journée du 15 février ainsi que l'irradiation G_o pour cette journée supposée être sans nuage

Les données s'écrivent $i = \varphi = 43,67^\circ$ $\gamma = 0$, $a^* = 0,3$ TSV = 12 h.

Pour le 15 février, on relève (cf. tableau III.3) $n = 46$ (numéro du jour) et $\delta = -13,3^\circ$

À midi solaire $h = h_m = \sin^{-1}[\cos(-13,3^\circ - 43,67^\circ)] = 33^\circ$

L'angle horaire au coucher $\omega_c = \cos^{-1}[\frac{\tan(43,67^\circ) \tan(-13,3^\circ)}{1}] = 77^\circ$

La durée du jour $ddj = 2 \times 77/15 = 10,26$ h.

On utilise à présent les formules du tableau III.6 qui donne G_h^* et I^*

Le ciel étant moyennement troublé, on a pour les éclairements

$$I^* = 1230 \exp\left(-\frac{1}{3,8 \sin(33 + 1,6)}\right) = 773,8 \text{ W/m}^2$$

$$G_h^* = 1080 (\sin 33^\circ)^{1,22} = 514,6 \text{ W/m}^2$$

$$S_h^* = 773,8 \sin 33^\circ = 421,4 \text{ W/m}^2$$

$$D_h^* = G_h^* - S_h^* = 514,6 - 421,4 = 93,2 \text{ W/m}^2$$

Les rapports d'éclairement donnent

$$R_s = \frac{\sin 43,67^\circ}{\tan 33^\circ} + \cos 43,67^\circ = 1,787,$$

$$R_D = \left(\frac{1 + \cos 43,67^\circ}{2}\right) + \left(\frac{1 - \cos 43,67^\circ}{2}\right) 0,3 \frac{514,6}{93,2} = 1,091,$$

$$R_G = \left(1,787 - \frac{1 + \cos 43,67^\circ}{2}\right) \frac{421,4}{514,6} + \frac{1 + \cos 43,67^\circ}{2} + \left(\frac{1 - \cos 43,67^\circ}{2}\right) 0,3 = 1,661$$

On en déduit

$$S^* = 1,787 \times 421,4 = 753 \text{ W/m}^2,$$

$$D^* = 1,091 \times 93,2 = 102 \text{ W/m}^2,$$

$$G^* = 1,661 \times 514,6 = 855 \text{ W/m}^2$$

Finalement on peut rassembler ces résultats dans le tableau ci-dessous

$n = 46$	$\delta = -13,3^\circ$	$\omega = 0$
$a = 0$	$h = 33^\circ$	$\omega_0 = 77^\circ$
		$ddj = 10,26 \text{ h}$
$I^* = 774 \text{ W/m}^2$		$G_h^* = 515 \text{ W/m}^2$
$S_h^* = 421 \text{ W/m}^2$	$D_h^* = 93 \text{ W/m}^2$	
$R_S = 1,787$	$R_D = 1,091$	$R_G = 1,661$
$S^* = 753 \text{ W/m}^2$	$D^* = 102 \text{ W/m}^2$	$G^* = 855 \text{ W/m}^2$

Le ciel étant clair l'irradiation sur la journée du 15 février est obtenue par intégration de l'éclairement global

$$G_o(i, \gamma) = \int_{LS}^{CS} G^*(i, \gamma) dt$$

Un calcul manuel serait fastidieux puisqu'il faudrait recommencer plusieurs fois le calcul de G^* en faisant varier l'heure TSV. La programmation, avec un pas $\Delta t = 1 \text{ h}$, permet d'arriver rapidement à la solution avec une bonne précision. Dans notre cas, on obtient

$$G_o = 5,40 \text{ kWh/m}^2$$

Un calcul approché peut être obtenu en supposant une variation sinusoïdale de l'éclairement sur un plan horizontal; on peut alors écrire (cf. §4.2), puisque $G_h^* = G_{hm}^*$ dans notre cas (calcul effectué pour 12 h TSV)

$$G_{oh} = 2 \times \frac{10,26}{\pi} \times 514,6 = 3361 \text{ Wh/m}^2 = 3,36 \text{ kWh/m}^2$$

En multipliant la valeur de G_{oh} par le rapport d'éclairement global R_G calculé plus haut, on obtient une valeur approché de l'irradiation $G_o(i, \gamma)$. Soit

$$G_o = 1,661 \times 3,361 = 5,58 \text{ kWh/m}^2$$

Le résultat est très proche du calcul par ordinateur et peut suffire dans la plupart des cas. Mais il faut bien avoir en tête que ce dernier calcul n'est pas rigoureux puisque cela suppose que la valeur du rapport d'éclairement global R_G est constante sur toute la durée du jour ce qui n'est pas le cas compte tenu de sa définition qui fait intervenir les paramètres a , h , i et γ , c'est-à-dire la position relative du soleil par rapport au capteur

- Sur un mois

Connaître l'énergie reçue durant le mois de février, par exemple, nécessite la connaissance de la nébulosité moyenne. Seule des mesures sur site sont valables. On peut néanmoins en avoir une idée si le capteur se trouve dans une région où le facteur d'irradiation e a été déterminé au moyen de mesures météorologiques (cf. tableau III.7).

Pour connaître l'énergie susceptible d'être reçue durant un mois donné, il suffit de reprendre le calcul précédent pour chacun des jours du mois, de faire la somme des résultats obtenus et de multiplier le tout par le facteur d'irradiation e .

Il existe une méthode plus rapide qui consiste à faire le calcul de l'irradiation pour la journée du 15 du mois et de multiplier le résultat par le nombre de jours de ce même mois. Puis on multiplie ce nouveau résultat par le facteur d'irradiation e correspondant à ce mois. Le résultat ainsi obtenu est proche de celui effectué en faisant la somme des irradiances journalières.

Il est bien évident que le résultat n'a rien d'absolu; il a une connotation statistique et ne peut être considéré que comme prévisionnel.

* Application III.14

Dans le cas de l'application précédente, on a obtenu le résultat suivant

$G_0 = 5,40 \text{ kWh/m}^2$ pour la journée du 15 février.

Pour le mois de février (28 jours), si tous les jours étaient clairs, on recevrait une énergie proche de

$G_0 = 28 \times 5,40 = 151 \text{ kWh/m}^2$

En tenant compte du facteur d'irradiation e qui vaut 0,68, à Nice, au mois de février, l'énergie susceptible d'être reçue en moyenne s'élève à :

$G = 0,68 \times 151 = 103 \text{ kWh/m}^2$

• Sur l'année

L'énergie totale susceptible d'être reçue par une surface sur une année complète est obtenue en répétant le calcul précédent pour chacun des mois de l'année et en faisant la somme des résultats obtenus. La plage de temps étant élargie, la valeur statistique du résultat obtenu est meilleure. Néanmoins, l'irradiation annuelle est susceptible de changer d'une année sur l'autre, le climat étant souvent imprévisible.

On peut aussi utiliser la méthode de régression linéaire $G(i, \gamma) = (a_1 + a_2 \cdot \sigma) C_0(i, \gamma)$ comme vu précédemment si l'on connaît les valeurs locales annuelles de σ , a_1 et a_2 .

* Application III.15

En conservant les hypothèses de l'exemple précédent, on peut dresser le tableau ci-dessous.

On y trouve pour chaque mois

- le nombre de jours n_{jm} du mois,
- le facteur d'irradiation e ,
- l'irradiation G_0 pour la journée du 15 de chaque mois par ciel clair,
- l'irradiation $G(i, \gamma)$ mensuelle calculée en tenant compte du facteur e .
- l'irradiation mensuelle mesurée à Nice sur une surface orientée plein sud et inclinée de la latitude du lieu.

La somme des termes des deux dernières colonnes fournit l'énergie annuelle susceptible d'être reçue. Le calcul donne une énergie solaire récupérable de 1680 kWh par an et par m^2 de surface réceptrice.

Ce résultat est très proche de celui obtenu par des mesures réelles de l'ensoleillement sur le site de Nice 1731 kWh/m^2 . La différence est inférieure à 3 %.

mois	n_{jm}	e	G_0 kWh/m^2 pour le 15	$G(i, \gamma)$ $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{mois}$	
				calculs	mesures
janvier	31	0,64	4,139	82,1	112,5
février	28	0,68	5,399	102,8	114,8
mars	31	0,66	6,642	135,9	163,4
avril	30	0,71	7,492	159,6	163,8
mai	31	0,71	7,762	170,8	160,6
juin	30	0,76	7,775	177,3	160,2
juillet	31	0,84	7,773	202,4	166,8
août	31	0,82	7,660	194,7	173,0
septembre	30	0,78	7,071	165,5	172,8
octobre	31	0,69	5,891	126,0	144,2
novembre	30	0,66	4,499	89,1	101,7
décembre	31	0,63	3,771	73,6	97,7
année				1679,8	1731,5

Comparons ces résultats annuels à celui que l'on peut obtenir en utilisant la méthode de régression linéaire $G(i,\gamma) = (a_1 + a_2 \cdot \sigma) C(i,\gamma)$. En considérant les valeurs données au tableau III.5, on peut écrire $\sigma = 0,62$, $a_1 = 0,17$ et $a_2 = 0,63$.

Il faut connaître la valeur annuelle de l'irradiation $C(i,\gamma)$ reçue par la surface hors atmosphère. On utilise la méthode explicitée à l'application III.11. Les résultats sont donnés au tableau ci-dessous. C_h et $C(i,\gamma)$ sont donnés en kWh/m² pour le mois considéré.

On en déduit la valeur annuelle

$$G(i,\gamma) = (0,17 + 0,63 \times 0,62) \times 3464,4 = 1942 \text{ kWh/m}^2$$

contre une irradiation annuelle mesurée de 1731,5 kWh/m²

On obtient un résultat en excès de 12 %.

mois	n	δ (°)	ω_0 (°)	ddj (h)	C_h kWh/m ²	$C(i,\gamma)$ kWh/m ²
janvier	15	-21,3	68,2	9,09	105,0	277,2
février	46	-13,3	77,0	10,26	136,8	274,4
mars	74	-2,8	87,3	11,64	214,7	319,7
avril	105	9,4	99,1	13,21	279,1	302,1
mai	135	18,8	109,0	14,53	343,1	286,9
juin	166	23,3	114,3	15,24	356,8	259,5
juillet	196	21,5	112,1	14,95	358,5	276,2
août	227	13,8	103,5	13,81	314,1	302,5
septembre	258	2,2	92,1	12,28	237,3	309,6
octobre	288	-9,6	80,7	10,76	173,6	311,8
novembre	319	-19,1	70,6	9,42	113,3	276,4
décembre	349	-23,3	65,7	8,76	93,5	268,1
					2725,6	3464,4

L'application précédente montre que l'on peut obtenir des estimations d'énergie solaire récupérable avec une bonne précision si l'on possède certaines valeurs climatiques du site concerné.

Il n'en reste pas moins vrai que les phénomènes météorologiques fortement aléatoires peuvent entraîner une marge d'erreur importante si la durée d'étude est trop courte.

Pour un bilan économique, il sera donc nécessaire d'étudier le projet sur une période de cinq à dix ans. Sur une période d'un an les résultats obtenus par le calcul pourraient s'avérer erronés.



ville	%	jan	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	moy
Ajaccio 41°55'	σ e	45 59	47 60	55 66	61 71	65 74	75 81	84 88	81 86	74 81	60 70	48 61	41 56	61 71
Besançon 47°15'	σ e	25 44	33 50	46 60	45 59	48 61	51 63	53 65	53 65	49 62	41 56	27 45	24 43	41 56
Biarritz 43°28'	σ e	30 48	25 51	45 59	47 60	46 60	48 61	49 62	50 63	47 60	43 57	33 50	23 42	41 56
Bordeaux 44°50'	σ e	28 46	35 51	47 60	51 63	50 63	55 66	54 66	57 68	51 63	44 58	30 48	24 43	44 58
Brest 48°27'	σ e	25 44	30 48	33 50	47 60	47 60	44 58	43 57	47 60	41 56	36 52	25 44	22 42	37 53
Clermont-Fd 45°48'	σ e	28 46	35 51	44 58	45 59	46 60	50 63	56 67	56 67	47 60	41 56	29 47	24 43	42 56
Embrun 44°34'	σ e	50 63	58 69	62 72	60 70	56 67	61 71	69 77	68 76	68 76	60 70	54 66	50 63	60 70
Grenoble 45°10'	σ e	30 48	38 54	48 61	50 63	51 63	56 67	62 72	60 70	53 65	41 56	26 45	23 42	45 59
Lille 50°44'	σ e	23 42	27 45	36 52	44 58	42 57	42 57	41 56	40 55	40 55	34 51	19 39	16 37	34 50
Lyon 45°43'	σ e	23 42	34 51	50 63	51 59	53 65	56 67	60 70	59 69	53 65	40 55	24 43	18 39	43 57
Marseille 43°27'	σ e	48 61	56 67	58 69	64 73	65 74	71 78	80 85	76 82	68 76	57 68	51 63	45 59	62 71
Nice 43°40'	σ e	52 64	57 68	54 66	61 71	61 71	68 76	78 84	76 82	71 78	59 69	54 66	50 63	62 72
Nîmes 43°52'	σ e	45 59	57 68	55 66	62 72	62 72	70 78	78 84	73 80	64 73	55 66	48 61	45 59	60 68
Paris 48°49'	σ e	21 41	29 47	49 62	49 62	51 63	57 68	51 63	50 63	48 61	38 64	51 41	17 38	43 56
Perpignan 42°44'	σ e	56 67	59 69	58 69	62 72	57 68	62 72	70 78	66 75	63 72	56 67	54 66	49 62	59 70
Poitiers 46°35'	σ e	29 47	34 51	46 60	55 66	51 63	52 64	56 67	56 67	53 65	47 60	28 46	23 42	44 58
Rennes 48°04'	σ e	25 44	32 49	44 58	47 60	47 60	48 61	48 61	48 61	43 57	36 52	25 44	21 41	39 54
Strasbourg 48°33'	σ e	19 39	28 46	43 57	43 57	46 60	46 60	47 60	49 62	44 58	34 51	18 39	15 36	36 52
Toulouse 43°36'	σ e	29 47	39 54	51 63	52 64	50 63	52 64	56 67	57 68	54 66	46 60	32 49	24 43	45 59

Tableau III.7

Facteur d'éclairement σ et facteur d'irradiation e , en %, mois par mois et en moyenne annuelle (dernière colonne), pour différentes villes de France.

CHAPITRE IV

LES CAPTEURS PLANS

Les capteurs solaires plans sont les éléments fondamentaux de la transformation de l'énergie solaire en énergie thermique à basse température. Sans concentration du rayonnement solaire, le flux d'énergie tombant sur une surface située au niveau de la mer ne peut guère dépasser 1 kW/m^2 . Cette valeur ne permet pas d'atteindre des températures supérieures à 100°C . Par contre ils ne nécessitent pas un suivi du soleil et utilisent les composantes directe et diffuse du rayonnement incident. Ils sont principalement utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS) et le chauffage d'habitations ou de piscines.

1. ÉLÉMENTS DE CONSTRUCTION

1.1 Surface absorbante

Son rôle est de transformer le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde en chaleur. La fraction du rayonnement solaire incident qui est absorbée par le capteur est appelée *facteur d'absorption solaire* α^* (ou *absorptivité*) de la surface. Le complément à 1 de cette fraction correspond au *facteur de réflexion solaire* ρ^* (ou *réflectivité*) dans la mesure où la plaque est opaque et donc que le *facteur de transmission solaire* τ^* (ou *transmissivité*) est nul.

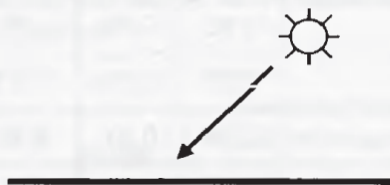


Figure IV.1 – Schéma d'un capteur plan limité à la seule plaque absorbante.

L'absorbeur, en chauffant, va rayonner dans l'infrarouge. La fraction d'énergie effectivement rayonnée sur l'énergie que rayonnerait la surface considérée comme un corps noir est appelée *facteur d'émission infrarouge* ϵ ou *émissivité*.

L'émittance E d'une surface à la température T s'écrit

$$E = \epsilon \sigma T^4$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

On appelle *sélectivité* le rapport du facteur d'absorption solaire α^* sur le facteur d'émission infrarouge ϵ .

Dans les applications du chauffage solaire on cherche à obtenir une grande sélectivité en augmentant la partie absorbée du rayonnement solaire incident et en diminuant la partie réfléchi. Ceci est possible dans la mesure où la bande spectrale d'absorption solaire [$\lambda \leq 3 \mu\text{m}$] et la bande spectrale d'émission infrarouge [$\lambda \geq 3 \mu\text{m}$] ne se recouvrent pratiquement pas. On appelle *longueur d'onde de coupure*, que l'on note λ_c , la longueur d'onde qui sépare ces deux bandes spectrales. Dans la plupart des applications solaires, $\lambda_c \approx 3 \mu\text{m}$.

Il est à noter que dans le cas des satellites il est le plus souvent nécessaire de protéger les parois du rayonnement solaire par des revêtements dont la sélectivité est à l'opposé de celle des capteurs solaires servant au chauffage.

La figure ci-dessous illustre cette caractéristique qu'est la sélectivité.

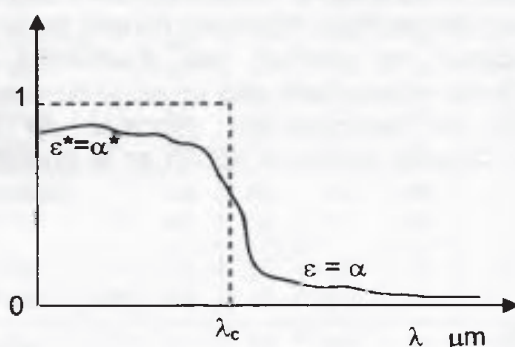


Figure IV.2 – Propriété d'une surface sélective le facteur d'absorption α^* pour les courtes longueurs d'onde (rayonnement solaire) est proche de 1 tandis que le facteur d'émission ε pour les grandes longueurs d'onde (infrarouge) est faible.

Le tableau suivant donne la sélectivité de quelques surfaces. Notons que c'est le revêtement qui compte une surface d'un matériau donné mais revêtue d'une couche de peinture noire ou blanche n'aura pas le même comportement sur le plan des échanges radiatifs.

état de surface de différents matériaux	α^*	ε	α^*/ε
cuivre poli	0,25	0,02	12,5
film plastique recouvert d'or	0,30	0,03	10
acier poli	0,63	0,09	7
aluminium anodisé	0,80	0,14	5,71
nickel brillant	0,34	0,07	4,86
aluminium poli	0,10	0,04	2,5
peinture noire (silicate)	0,97	0,88	1,10
peinture aluminium	0,26	0,26	1
acier sablé	0,75	0,80	0,94
SSM Kapton aluminisé de 0,5 mm d'épaisseur	0,36	0,52	0,69
peinture blanche (silicate)	0,14	0,90	0,16
OSR	0,11	0,83	0,13

Tableau IV.1 – Caractéristiques radiatives de quelques surfaces. La sélectivité est le rapport de l'absorptivité solaire α^* sur l'émissivité infrarouge ε . Les OSR (Optical Solar Reflector) sont des miroirs en verre argenté ou aluminisé. Les SSM (Second Surface Mirrors) sont des films plastiques (polyamide, polyester) souples et métallisés (argent, aluminium)

* Application IV.1

Calculons la température d'équilibre T (en °C) d'une plaque plane de surface S située à la limite de l'atmosphère terrestre et soumise au rayonnement solaire direct.

Compte tenu de la faible épaisseur de l'atmosphère par rapport au rayon terrestre, on peut utiliser la formule donnant la puissance échangée par rayonnement \dot{q}_r (en W/m^2) entre deux

plans parallèles (1) et (2) $\dot{q}_r = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$ formule qui se simplifie en $\dot{q}_r = \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4)$

dans le cas où $\varepsilon_1 = \varepsilon$ et $\varepsilon_2 = 1$, c'est-à-dire si la surface (2) peut être considérée comme *noire* au sens du rayonnement¹

Une face de la plaque rayonne avec l'espace, CN à T_∞ , l'autre face rayonnant avec le système Terre-Atmosphère, considéré comme un CN à T_T . Le bilan radiatif s'écrit alors

$\varepsilon \sigma [(T_\infty^4 - T^4) + (T^4 - T_T^4)] S$. Il est égal aux apports solaires $\alpha^* C^* S$.

En régime permanent l'équilibre énergétique s'écrit donc

$\alpha^* C^* S = \varepsilon \sigma [(T_\infty^4 - T^4) + (T^4 - T_T^4)] S$.

On connaît la température du système Terre-atmosphère $T_T = -24,5^\circ C = 248 K$ et la constante solaire $C^* = 1353 W/m^2$

On peut négliger $T_\infty \approx 4K$ d'où

$$T = \left[\frac{1}{2} \left(T_T^4 + \frac{\alpha^* C^*}{\varepsilon \sigma} \right) \right]^{\frac{1}{4}} = \left[\frac{1}{2} \left(248^4 + \frac{\alpha^*}{\varepsilon} \frac{1353}{5,67 \cdot 10^{-8}} \right) \right]^{\frac{1}{4}}$$

En menant ce calcul pour trois types de revêtement, on obtient le tableau suivant qui donne la température d'équilibre T de la plaque en fonction du rapport α^*/ε

revêtement	α^*/ε	T (°C)
cuivre poli	12,5	350
peinture noire	1,10	77
OSR	0,13	-31

Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique.

Dans le cas des métaux on utilise le plus couramment le cuivre, l'acier inoxydable ou bien l'aluminium. Certaines de leurs caractéristiques thermophysiques sont données dans le tableau ci-dessous.

métal	conductivité thermique λ W/m.K	chaleur massique c_p J/kg.K	masse volumique ρ kg/m ³	diffusivité $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ 10 ⁻⁶ m ² /s
cuivre	384	398	8900	108
acier inoxydable	14	460	7800	4
aluminium	204	879	2700	86

Tableau IV.2 – Caractéristiques thermophysiques de matériaux métalliques pouvant constituer la plaque de capteurs solaires plans.

¹ La surface (1) sera dite *grise* sur une plage de longueur d'onde $[\lambda_1, \lambda_2]$ si le facteur d'absorption α ne dépend pas de la longueur d'onde λ $\alpha_\lambda = \alpha < 1, \forall \lambda$.

L'emploi de matières plastiques entraîne des différences notables comparées aux métaux.

Les avantages sont

- la légèreté,
- la possibilité de teinter le produit dans la masse et donc de ne pas craindre les rayures,
- la faible sensibilité des plastiques à la corrosion

Les inconvénients sont

- une mauvaise conductibilité thermique,
- un vieillissement dû au rayonnement ultraviolet,
- une tenue médiocre aux températures élevées.

1.2 Fluide caloporteur

Pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante, on utilise habituellement soit l'air, soit l'eau.

Par rapport à l'eau, l'air a les avantages suivants

- pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été lorsque le soleil "tape" fort,
- avec de l'air sec, il n'y a pas de problème de corrosion,
- toute fuite est sans conséquence,
- il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur dans le cas du chauffage de locaux,
- le système à mettre en œuvre est plus simple et plus fiable.

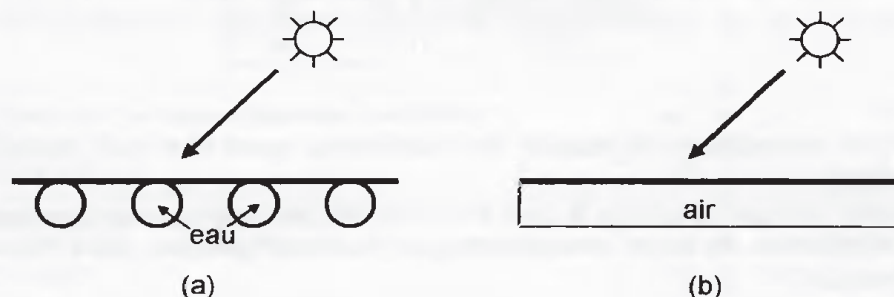


Figure IV.3 – Schéma d'un capteur plan avec son système d'évacuation de la chaleur a) à eau, b) à air.

Mais son utilisation entraîne les inconvénients suivants

- l'air ne peut servir qu'au chauffage de locaux,
- le produit de la masse volumique ρ par la chaleur spécifique c_p est faible $\rho \cdot c_p = 1225 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ pour l'air contre $4,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ pour l'eau,
- les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant compte tenu du point précédent,
- les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau.

Dans le cas de tuyauteries soudées sur la face arrière de la plaque absorbante, il faut prendre soin aux soudures afin de réduire le plus possible la résistance thermique de contact.

1.3 Couverture transparente

Elle est facultative mais peut permettre d'accroître sensiblement le rendement du convertisseur par effet de serre.

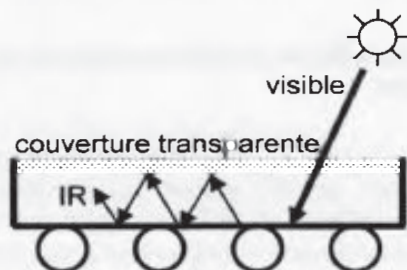


Figure IV.4 – Schéma d'un capteur possédant une couverture transparente au rayonnement solaire.

L'intérêt d'une couverture transparente pour le rayonnement solaire est d'autant plus grand que la température de fonctionnement du convertisseur est élevée. C'est donc pour des températures dépassant 70°C que l'on peut envisager d'installer un double vitrage afin d'accroître le rendement.

Les couvertures transparentes habituelles sont pour la plupart en verre mais on peut trouver aussi des produits de synthèse tel que le polycarbonate, le polyméthacrylate ou bien le polyester armé.

Pour certaines applications, telles que la réalisation de serres agricoles, on peut utiliser des films minces. Le tableau IV.3 fournit quelques indications sur ces matériaux.

matériau	noms commerciaux	épaisseur mm	τ^* %	ρ kg/m ³	c_p J/kg.K	λ W/m.K	k_d 10 ⁻⁵ /K
verre à vitre		3	85-92	2700	840	0,93	0,9
polycarbonate	Makrolon Lexan	3,2	82-89	1200	1260	0,2	6,6
polyméthacrylate	Altuglas Plexiglas	3,2	89-92	1200	1460	0,2	7
polyester armé		1	77-90	1400	1050	0,21	3,5
polytéréphtalate d'éthylène	Mylar Terphane	0,025	84	1,38	1170	0,25	7
polyfluoroéthylène propylène	Teflon FEP	0,05	97	2,15	1170	0,25	10
polyfluorure vinyle	Tedlar	0,1	93	1,50	1380	0,12	4

Tableau IV.3 – Propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaques au rayonnement infrarouge, pouvant servir à réaliser un effet de serre.

τ^* facteur de transmission solaire, ρ masse volumique, c_p chaleur massique, λ conductivité thermique, k_d coefficient de dilatation thermique.

Facteur de transmission

Le coefficient de transmission τ est le produit d'un coefficient τ_r relatif à la réflexion partielle du rayonnement incident, et d'un coefficient τ_a relatif à l'absorption dans le milieu transparent. On a donc

$$\tau = \tau_a \cdot \tau_r.$$

Lorsqu'un rayonnement change de milieu de propagation, il subit au passage de l'interface, appelée *dioptre*, une déviation fonction de l'indice de réfraction n du milieu, selon la loi de Descartes

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

où n_1 et n_2 sont les indices de réfraction absolue des milieux de propagation et θ_1 et θ_2 les angles que font les rayons avec la normale au dioptre.

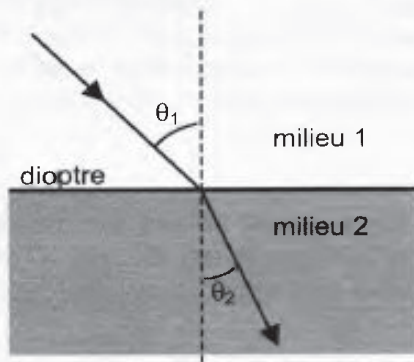


Figure IV.5 – Réfraction d'un rayon lumineux à la traversée d'un dioptre séparant deux milieux de réfringence différente.

Le coefficient de réflexion peut être déterminé par la formule de Fresnel

$$\rho = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right]$$

Pour un rayonnement incident normal, on obtient $\rho = \left[\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right]^2$

ou encore, si le milieu 1 est de l'air ($n_1 \approx 1$) et en posant $n_2 = n$ $\rho = \left[\frac{n - 1}{n + 1} \right]^2$

La couverture transparente d'un capteur solaire constitue une lame à faces parallèles; il y a donc deux interfaces à l'origine de pertes par réflexion. Pour un rayon d'intensité unité, une fraction $(1-\rho)$ pénètre dans le matériau tandis qu'une fraction ρ est réfléchiée. La partie transmise se réfléchit à son tour et ne transmet donc qu'une fraction $(1-\rho)^2$. Et ainsi de suite. Le coefficient de transmission τ_r s'écrit donc (cf. fig. IV.6)

$$\tau_r = (1 - \rho)^2 \sum_{n=0}^{\infty} \rho^{2n} = \frac{1 - \rho}{1 + \rho}$$

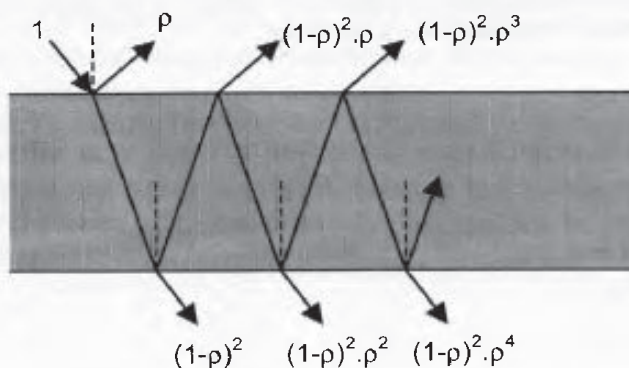


Fig. IV.6 – Effet des multiples réflexions sur le facteur de transmission d'une vitre.

Pour un système avec N couvertures, on aura $\tau_r = \frac{1 - \rho}{1 + (2N - 1)\rho}$

Le coefficient de transmission due à l'absorption du milieu est donnée par

$$\tau_a = \exp(-k_e \cdot l)$$

avec k_e coefficient d'extinction et l longueur parcourue par le rayonnement dans le milieu.

* Application IV.2

Considérons un double vitrage fabriqué avec du verre de 3 mm d'épaisseur, d'indice de réfraction relatif $n=1,5$ et de coefficient d'extinction $k_e=0,2$ /cm.

Déterminons la fraction du rayonnement qui est transmise dans le cas où $\theta_1=0$ et dans celui où $\theta_1=60^\circ$

a) $\theta_1=0^\circ \Rightarrow \theta_2=0^\circ$

$$\rho = \left(\frac{1,5 - 1}{1,5 + 1} \right)^2 = 0,04$$

$$\tau_r = \frac{1 - 0,04}{1 + (2 \times 2 - 1) 0,04} = 0,86$$

$$\tau_a = \exp(-0,2 \times 2 \times 0,3) = 0,89$$

$$\tau = 0,86 \times 0,89 = 0,76$$

b) $\theta_1=60^\circ$

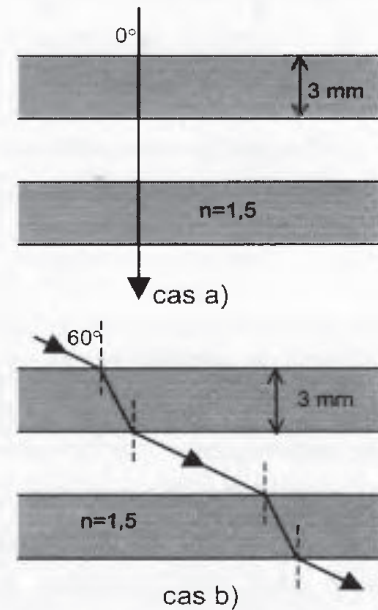
$$\sin 60^\circ = 1,5 \sin \theta_2 \Rightarrow \theta_2 = 35^\circ$$

$$\rho = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(35^\circ - 60^\circ)}{\sin^2(35^\circ + 60^\circ)} + \frac{\tan^2(35^\circ - 60^\circ)}{\tan^2(35^\circ + 60^\circ)} \right] = 0,09$$

$$\tau_r = \frac{1 - 0,09}{1 + (2 \times 2 - 1) 0,09} = 0,72$$

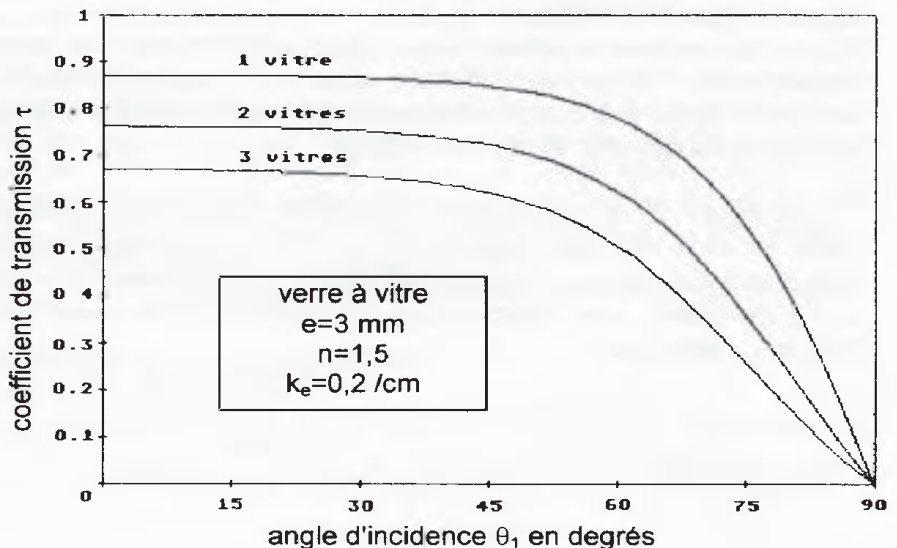
$$\tau_a = \exp(-0,2 \times 2 \times 0,3 / \cos 35^\circ) = 0,86$$

$$\tau = 0,72 \times 0,86 = 0,62$$



En renouvelant les calculs de l'exemple précédent mais en faisant varier le nombre de vitres et l'angle d'incidence θ_1 , on peut tracer la courbe de la figure IV 7. On voit qu'il n'y a pas un grand intérêt à multiplier le nombre de vitres car si l'on gagne en effet de serre, on perd en coefficient de transmission et ... en coût de fabrication.

Figure IV.7 – Effet de l'angle d'incidence θ_1 et du nombre de vitres sur le facteur de transmission τ .
Les calculs ont été réalisés pour un verre à vitre de 3 mm d'épaisseur.



Remarque les multiples réflexions interviennent aussi dans le bilan global d'absorption solaire de la surface absorbante. Pour 1 joule d'énergie solaire reçu par celle-ci, seule la fraction α_p^* est absorbée, le reste $(1 - \alpha_p^*)$ étant réfléchi. Cette fraction va se réfléchir sur la vitre dont le coefficient de réflexion solaire est noté ρ_c^* . Une quantité d'énergie égale à $(1 - \alpha_p^*) \cdot \rho_c^*$ va alors atteindre la surface absorbante qui emmagasinera la quantité $(1 - \alpha_p^*) \cdot \rho_c^* \cdot \alpha_p^*$.

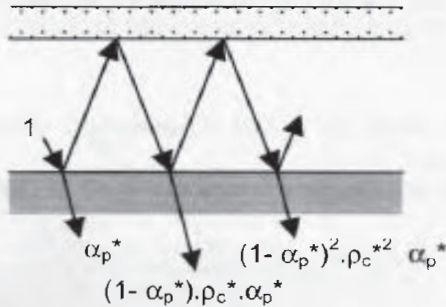


Figure IV.8 – Effet des multiples réflexions plaque-vitre.

En continuant le raisonnement, on peut définir le coefficient d'absorption solaire effectif α_e^* par la somme suivante

$$\alpha_e^* = \alpha_p^* \sum_{i=0}^{\infty} [(1 - \alpha_p^*) \rho_c^*]^i = \frac{\alpha_p^*}{1 - (1 - \alpha_p^*) \rho_c^*}$$

En considérant un coefficient d'absorption solaire $\alpha_p^* = 0,9$ et un facteur de réflexion solaire $\rho_c^* = 0,2$, on trouve un facteur d'absorption effectif $\alpha_e^* = 0,92$, soit 2% de plus, ce qui reste somme toute négligeable.

L'effet de serre

Son principe réside dans le fait qu'un matériau *transparent* pour le rayonnement solaire peut être *opaque* au rayonnement infrarouge. Le rayonnement de courtes longueurs d'onde va traverser ce matériau, échauffer la plaque absorbante qui va rayonner dans les grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire dans l'infrarouge. Ce rayonnement infrarouge, ne pouvant s'échapper, va être en partie absorbé par la couverture qui s'échauffe et en partie réfléchi vers la plaque qui elle aussi s'échauffe. Mais bien entendu si la puissance reçue par le capteur est constante, au bout d'un certain temps, un équilibre s'installe. Les apports solaires sont alors égaux aux pertes thermiques. Ces dernières se font principalement par rayonnement et convection de la couverture avec l'extérieur.

Quand le capteur a atteint son équilibre thermique, la température de la plaque est d'autant plus élevée que l'effet de serre est plus prononcé. On peut s'en rendre compte avec les capteurs à double vitrage qui permettent d'atteindre des températures d'équilibre plus grandes qu'avec un simple vitrage.

La figure IV.9 représente l'émittance réduite du soleil à la limite de l'atmosphère (AM0) et celle du corps noir à 323 K (50°C). La réduction est effectuée en divisant la valeur obtenue, pour la longueur d'onde λ , par la valeur du maximum d'émission. La loi de Wien nous indique que le maximum d'émission est obtenu pour la longueur d'onde λ_m telle que

$$\lambda_m \cdot T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}.$$

Dans notre cas

$$\lambda_m = \frac{2898}{323} \approx 9 \mu\text{m}$$

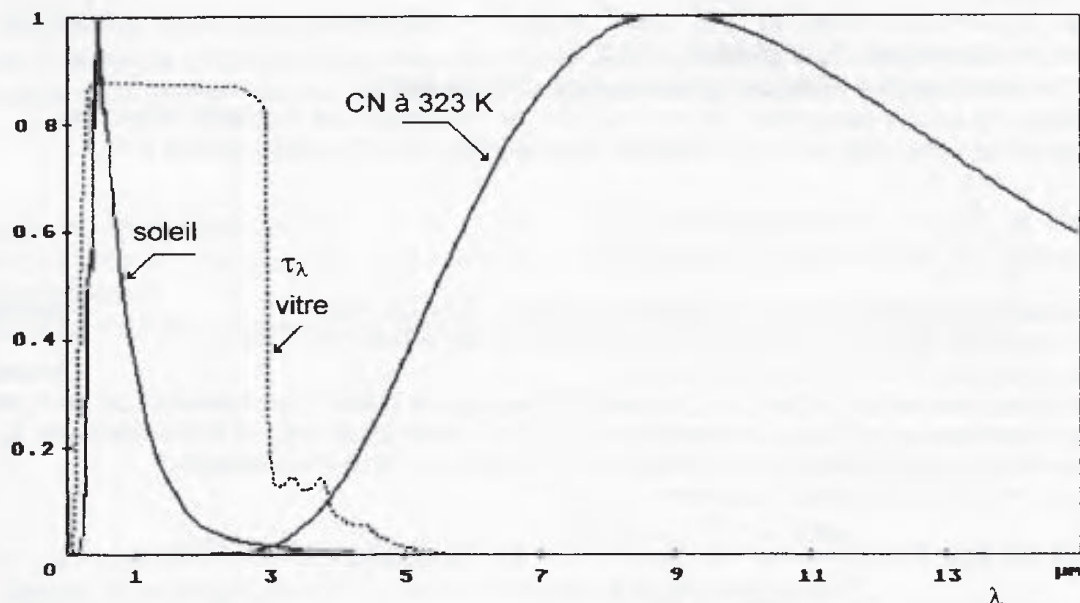


Figure IV.9 – Émittance réduite du soleil à la limite de l'atmosphère (AM0), émittance du corps noir à 323 K (50°) et coefficient de transmission τ_λ en fonction de la longueur d'onde λ . La réduction des émittances est faite par rapport à la valeur maximale.

Sur la même figure, on a représenté le coefficient de transmission τ_λ d'un verre de 3 mm d'épaisseur, à 2 % de Fe_2O_3 . On constate que ce verre ne laisse passer au maximum qu'environ 84 % de l'énergie lumineuse en provenance du soleil. Mais au-delà de 3 μm , correspondant à la longueur d'onde de coupure, il ne laisse pratiquement plus passer de rayonnement; il devient opaque.

Cette même figure montre qu'une surface chauffée à 50°C rayonne principalement dans l'infrarouge avec des longueurs d'onde supérieures à 3 μm . L'énergie rayonnée ne peut s'échapper par cette couverture qui, de transparente, est devenue opaque. La surface s'échauffe. Sa température augmentant, la courbe d'émission réduite se décale vers la gauche. Un nouvel équilibre est bien sûr atteint lorsque les pertes thermiques sont égales aux apports solaires.

* Application IV.3

Un capteur plan est constitué d'une plaque de cuivre recouverte d'une peinture noire ($\alpha_p^* = 0,97$, $\varepsilon_p = 0,88$). Déterminons la température T_p d'équilibre de la plaque avec et sans couverture transparente.

Le capteur reçoit un éclairement solaire supposé constant $G^* = 720 \text{ W/m}^2$. La couverture transparente est une vitre isotherme à T_c , ayant un facteur de transmission solaire global moyen $\tau_c^* = 0,75$ et un facteur d'émission infrarouge $\varepsilon_c = 0,83$. La face arrière du capteur est parfaitement isolée. La plaque échange cependant de l'énergie par sa face arrière avec le fluide caloporteur et par sa face avant avec l'environnement. La puissance utile \dot{Q}_u évacuée en régime permanent s'élève à 410 W/m^2 qu'il y ait une vitre ou non. Le coefficient de convection h_c entre la plaque et l'air ambiant, dans le cas sans vitrage, ou entre la vitre et l'air ambiant, dans le cas avec vitrage, s'élève à 13 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$. Dans ce dernier cas, le coefficient de convection naturelle h_{cn} entre la plaque et la vitre s'élève à 3,2 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$.

La température ambiante $T_a = 10^\circ\text{C}$. Le ciel est supposé être un corps noir à la température $T_\infty = 263 \text{ K}$.

- Température d'équilibre de la plaque sans effet de serre.

Puissance solaire absorbée $\dot{Q}^* = \alpha_p^* \cdot G^*$

Puissance perdue par rayonnement avec le ciel à T_∞ et par convection avec l'air ambiant à T_a

$$\dot{Q}_a = \varepsilon_p \sigma (T_p^4 - T_\infty^4) + h_c (T_p - T_a)$$

L'équation de bilan en régime permanent s'écrit $\dot{Q}^* = \dot{Q}_a + \dot{Q}_u$, soit

$$\alpha_p^* \cdot G^* = \varepsilon_p \sigma (T_p^4 - T_\infty^4) + h_c (T_p - T_a) + \dot{Q}_u$$

ou encore

$$0,97 \times 720 = 0,88 \times 5,67 \cdot 10^{-8} (T_p^4 - 263^4) + 13 (T_p - 283) + 410$$

dont la solution est $T_p = 294,6 \text{ K} = 21,5^\circ\text{C}$

• Température d'équilibre de la plaque avec effet de serre.

Puissance solaire absorbée $\dot{Q}^* = \tau_c^* \cdot \alpha_p^* \cdot G^*$ (en négligeant les multiples réflexions).

Puissance échangée par rayonnement et convection naturelle avec la vitre à T_c

$$\dot{Q}_a = \frac{\sigma (T_p^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} + h_{cn} (T_p - T_c)$$

L'équation de bilan en régime permanent s'écrit $\dot{Q}^* = \dot{Q}_a + \dot{Q}_u$ [équation 1]

Le bilan thermique de la vitre permet de relier les températures T_c et T_p

$$\dot{Q}_a(T_p) = \varepsilon_c \sigma (T_c^4 - T_{\infty}^4) + h_c (T_c - T_a). \quad [\text{équation 2}]$$

On a deux équations à deux inconnues. Ces équations n'étant pas linéaires, on peut procéder par itérations en se fixant arbitrairement T_c puis après avoir calculé la température T_p par la première équation, vérifier cette valeur de T_c grâce à la deuxième équation.

Soit $T_c = 15^\circ\text{C}$. On a, pour l'équation 1

$$0,75 \times 0,97 \times 720 = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (T_p^4 - 288^4)}{\frac{1}{0,88} + \frac{1}{0,83} - 1} + 3,2 (T_p - 288) + 410$$

qui a pour solution $T_p = 303 \text{ K} = 30^\circ\text{C}$.

La deuxième équation permet de déterminer la température T_c

$$\frac{5,67 \cdot 10^{-8} (303^4 - T_c^4)}{\frac{1}{0,88} + \frac{1}{0,83} - 1} + 3,2 (303 - T_c) = 0,83 \times 5,67 \cdot 10^{-8} (T_c^4 - 263^4) + 13 (T_c - 283)$$

On trouve $T_c = 286 \text{ K} = 13^\circ\text{C}$ ce qui est très proche de la valeur choisie arbitrairement. Il n'est donc pas nécessaire de recommencer le calcul en utilisant de nouveau l'équation 1. La température de la plaque avec effet de serre est donc proche de 30°C .

Mais dans le cas d'un capteur ce que l'on cherche n'est pas une température plus élevée de l'absorbeur mais plutôt une puissance utile plus grande. En se fixant la même température de plaque (soit $21,5^\circ\text{C}$), on peut accroître la puissance évacuée \dot{Q}_u grâce à l'effet de serre. (On trouverait alors $T_c = 10^\circ\text{C}$ et $\dot{Q}_u = 442 \text{ W/m}^2$)

1.4 Isolant

Pour minimiser les pertes calorifiques du système, il faut isoler ses parois. Vers l'avant c'est le plus souvent une lame d'air qui fait office d'isolant. Son épaisseur ne doit pas être trop importante pour limiter les transferts par convection. On choisira une distance comprise entre 2 et 3 cm.

À la partie arrière du capteur, on place une ou plusieurs couches d'isolant du type laine de verre, polystyrène, mousse de polyuréthane... Le tableau IV.4 donne les caractéristiques de différents matériaux pouvant servir d'isolant.

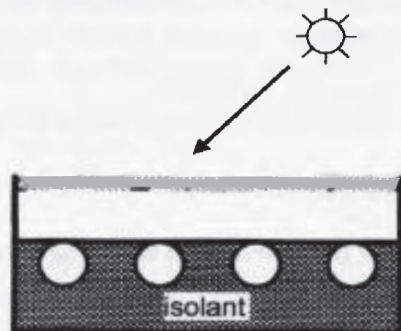


Figure IV.10 – Schéma d'un capteur solaire plan complet avec son isolant en face arrière.

Flux de chaleur traversant l'isolant

Aucune puissance n'est dissipée dans le milieu. Si on considère un régime permanent, la température est indépendante du temps et l'équation de la chaleur¹ s'écrit

$$\Delta T = 0.$$

On suppose que l'écoulement de la chaleur est monodirectionnel suivant la direction perpendiculaire au *mur*. Celui-ci est constitué de la plaque, de l'isolant et du coffre qui lui sert de protection.

Dans ces conditions, l'expression du flux de chaleur \dot{q} traversant l'isolant s'écrit

$$\dot{q} = \frac{T_p - T_a}{\sum_i \frac{e_i}{\lambda_i}}$$

l'indice i caractérisant l'un des matériaux rencontré par la chaleur durant son écoulement de la plaque, à la température T_p , vers l'extérieur à la température T_a .

* Application IV.4

On installe en face arrière d'un capteur solaire plan une plaque de polyuréthane de 50 mm d'épaisseur ($\lambda=0,029$ W/m.K) protégé de l'extérieur par un coffre en plastique ($\lambda=0,166$ W/m.K) de 5 mm.

On suppose connues les températures de la plaque $T_p=60^\circ\text{C}$ et extérieure $T_a=15^\circ\text{C}$.

Calculons la déperdition calorifique \dot{q} de ce capteur par sa face arrière en W/m^2 .

On obtient

$$\dot{q} = \frac{60 - 15}{\frac{0,05}{0,029} + \frac{0,005}{0,166}} = 25,7 \text{ W/m}^2$$

Remarquons que la résistance thermique du coffre plastique est faible [$0,03^\circ\text{C}/(\text{W/m}^2)$] devant celle de la couche de polyuréthane [$1,72^\circ\text{C}/(\text{W/m}^2)$]. Le coffre a un faible rôle d'isolant; il sert principalement de protection. D'ailleurs si on n'en tient pas compte dans le calcul, on trouve que le flux thermique $\dot{q} = 26,1 \text{ W/m}^2$ ce qui est très proche de la valeur trouvée plus haut.

Notons qu'il peut exister entre deux matériaux solides en contact une résistance thermique. Celle-ci est appelée tout simplement *résistance de contact*. Son importance dépend principalement de l'état de surface respectif des matériaux. Dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les deux faces en contact un film d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction. Presser les matériaux l'un contre l'autre permet de diminuer cette résistance de contact lorsque le but est de transmettre la chaleur. Dans le cas de l'isolation, c'est l'inverse qui est recherché et toute résistance de contact est bonne à prendre. Il ne faut donc pas comprimer les isolants car toute lame d'air joue le rôle d'un très bon isolant. N'oublions pas que l'air a une conductivité thermique très basse ($\lambda=0,025$ W/m.K à 20°C) et que s'il ne bouge pas² il apparaît comme le meilleur isolant (hormis le vide bien sûr).

¹ Cf. Annexe D *Éléments d'échanges thermiques, Conduction*.

² Pour empêcher l'air de bouger afin d'éviter les échanges thermiques par convection, on l'immobilise dans une structure solide telle que la laine (pull-over), la laine de verre, le polystyrène expansé, etc...

matériau	conductivité thermique λ W/m.K	masse volumique ρ kg/m ³	chaleur massique c_p J/kg.K	diffusivité $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ 10 ⁻⁷ m ² /s
air (à 20°C)	0,025	1,2	1003	208
mousse de polyuréthane	0,029	30	1600	6,0
laine de verre	0,036	40	840	10,7
polystyrène expansé	0,040	20	1500	13,3
laine de roche	0,040	40	840	11,9
laine (vêtement)	0,04	450	1880	0,47
neige (273 K)	0,046	100	1800	2,6
feutre d'amiante	0,047	116	800	5,1
liège expansé	0,048	120	1380	2,9
perlite	0,048	60	840	9,5
silicate de calcium	0,052	200	920	2,8
magnésie	0,055	200	880	3,1
soie	0,06	510	1250	0,94
béton cellulaire	0,075	280	800	3,3
vermiculite	0,09	80	880	12,8
papier journal comprimé	0,105	130	1340	6,0
bois de pin	0,118	500	1210	1,95
papier	0,14	700	1340	1,5
bois de sapin	0,144	535	272	9,9
caoutchouc pur	0,153	1200	2170	0,6
PVC	0,166	1380	1000	1,2
bois de chêne	0,198	825	2400	1,0
plâtre	0,35	800	800	5,5
brique	0,697	1700	900	4,6
sol naturel	1,5	1650		
glace (273 K)	2,21	917	2135	11,3

Tableau IV.4 – Propriétés thermiques de quelques matériaux pouvant servir d'isolant.
Note les valeurs sont données pour une température de 288K sauf mention contraire
 (la variation de λ avec la température est suffisamment faible dans les problèmes pratiques pour qu'on puisse la négliger).

2. RENDEMENT D'UN CAPTEUR PLAN

2.1 Bilan énergétique

Soit \dot{Q}^* l'énergie solaire absorbée par un capteur. Une partie de celle-ci est emmagasinée dans le fluide caloporteur; c'est l'énergie utile \dot{Q}_u . Cette énergie peut être directement utilisée (chauffage par air chaud par exemple) ou bien transférée à un stockage (ballon d'eau chaude par exemple).

Un capteur solaire est sujet à des pertes thermiques. Une partie de l'énergie absorbée est transférée vers l'environnement sous forme d'énergie thermique principalement par convection et rayonnement. Ces pertes seront notées \dot{Q}_a .

Enfin si on s'intéresse à une période de mise en température du système (au démarrage par exemple) il faudra tenir compte de l'énergie absorbée par le capteur nécessaire à cette montée en température. Cette énergie, notée \dot{Q}_t , dépend de l'inertie thermique de l'installation. On a donc

$$\dot{Q}^* = \dot{Q}_u + \dot{Q}_a + \dot{Q}_t$$

En notant G^* la puissance solaire globale reçue par le capteur, le rendement moyen de celui-ci sur une période Δt s'écrit

$$\bar{\eta} = \frac{\int_0^{\Delta t} \dot{Q}_u dt}{\int_0^{\Delta t} G^* dt}$$

2.2 Influence de la température de l'absorbeur

Pour étudier l'influence de la température de l'absorbeur, notée T_p , considérons un capteur plan à eau possédant une vitre. L'absorbeur est constitué d'une plaque plane sous laquelle sont soudés des tubes à section circulaire.

Les paramètres sont les suivants

- orientation du capteur : inclinaison i , azimut γ .
- dimensions : longueur L , largeur l , distance plaque-vitre b , épaisseur de l'isolant e .

Les hypothèses sont les suivantes

- Le régime est supposé permanent.
- La vitre et la surface absorbante sont supposées isothermes.
- On néglige tous les effets de bords, c'est-à-dire que l'on suppose un capteur infini, les grandeurs étant déterminées par m^2 de surface absorbante.
- Le ciel rayonne à la température T_∞ donnée par la formule empirique suivante

$$T_\infty = 0,0552 T_a^{1,5}$$

où T_∞ et T_a sont exprimées en degrés kelvin.

La figure IV 11 représente la géométrie du capteur étudié tandis que la figure IV 12 indique les paramètres utilisés pour exprimer les différentes températures.

Figure IV.11 – Schéma du capteur étudié.

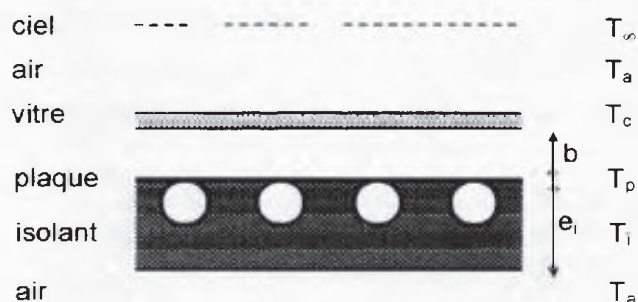
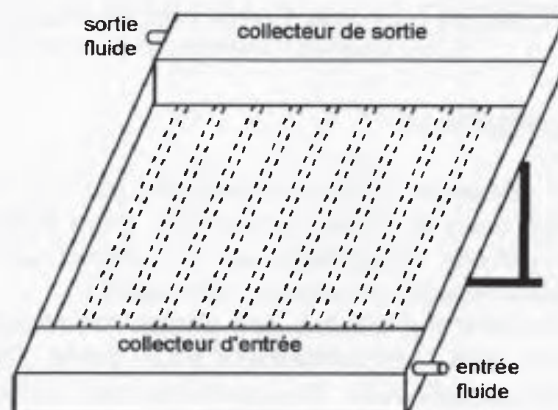


Figure IV.12 – Schéma donnant les températures des différents éléments intervenant dans la détermination du rendement d'un capteur plan.

En première approximation on peut écrire l'expression de la puissance solaire absorbée par le capteur

$$Q^* = G^* \tau_c^* \alpha_p^*$$

où τ_c^* est le coefficient de transmission solaire de la couverture transparente, calculé pour l'angle d'incidence du rayonnement direct et α_p^* le coefficient d'absorption solaire de la plaque constituant la surface absorbante. Celle-ci est à la température supposée uniforme T_p . C'est la température de l'absorbeur, encore appelée température de fonctionnement.

Notons que pour un calcul plus précis il faudrait tenir compte du fait que τ_c^* est différent selon que l'on s'intéresse au flux solaire direct S^* ou bien au flux solaire diffus D^* . Avec le premier il faut tenir compte de l'angle d'incidence tandis qu'avec le second, par définition, il n'y a pas de direction privilégiée.

Dans la suite nous négligerons l'énergie solaire absorbée par la vitre. En toute rigueur elle n'est pas nulle puisque l'on peut écrire

$$\rho_c^* + \alpha_c^* + \tau_c^* = 1$$

qui signifie que tout rayonnement tombant sur la vitre est soit réfléchi (ρ_c^*), soit absorbé (α_c^*), soit transmis (τ_c^*). Mais pour le rayonnement solaire de courte longueur d'onde, la fraction α_c^* est très faible et peut être négligée en première approximation.

Le **flux thermique** \dot{Q}_a perdu avec l'environnement peut être déterminé par une analogie électrique comme indiqué à la fig. IV 13.

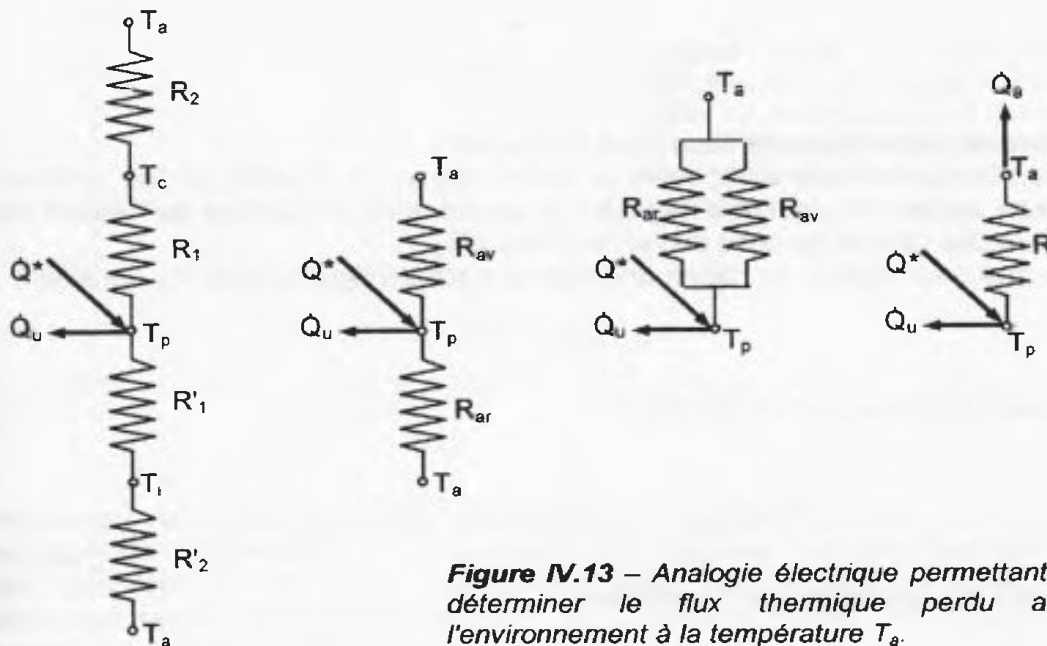


Figure IV.13 – Analogie électrique permettant de déterminer le flux thermique perdu avec l'environnement à la température T_a .

Soit R_1 la *résistance thermique* existant entre la surface absorbante à T_p et la vitre à T_c . La résistance thermique est l'inverse de la *conductance thermique*¹. Dans notre cas, cette dernière est la somme de deux termes : une conductance due à la convection naturelle qui règne dans l'air confiné entre la surface absorbante et la vitre et une autre due au phénomène d'échange radiatif intervenant entre ces deux surfaces à températures différentes.

Soit h_{c1} et h_{r1} les coefficients d'échange thermique relatifs respectivement à la convection et au rayonnement. On a

$$R_1 = \frac{1}{h_{c1} + h_{r1}}$$

Soit R_2 la résistance thermique entre la vitre et l'extérieur à T_a . De la même façon que pour R_1 , on a affaire à des échanges thermiques par convection et rayonnement. On notera h_{c2} et h_{r2} les coefficients d'échange correspondants. Et par suite

$$R_2 = \frac{1}{h_{c2} + h_{r2}}$$

R_1 et R_2 étant en série, la résistance thermique vers l'avant du capteur R_{av} s'écrit

$$R_{av} = R_1 + R_2.$$

Soit R'_1 la résistance thermique créée par l'isolant. On a affaire à de la conduction pure. Le coefficient d'échange par conduction thermique dans le cas du *mur semi-infini*² s'écrit dans notre cas

¹ La conductance thermique sera notée K et la résistance thermique R . On a donc $K=1/R$.

² La théorie du *mur semi-infini* suppose que la chaleur se propage dans une direction perpendiculaire au mur et seulement suivant cette direction. Elle ne tient donc pas compte des limitations spatiales du système plan étudié.

$$R'_1 = \frac{e_i}{\lambda_i}$$

où λ_i représente la conductivité thermique de l'isolant.

Soit R'_2 la résistance thermique entre la face externe de l'isolant et l'air ambiant. En général cette résistance peut être négligée, la température de surface de l'isolant étant le plus souvent très proche de celle de l'air ambiant à T_a .

De même que pour l'avant, on définit une résistance thermique arrière R_{ar} qui s'écrit

$$R_{ar} = R'_1 + R'_2.$$

La similitude électrique permet d'écrire

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{av}} + \frac{1}{R_{ar}} = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R'_1 + R'_2}$$

et en utilisant les conductances thermiques

$$K = K_{av} + K_{ar}$$

avec

$$K_{av} = \frac{1}{R_1 + R_2}$$

et

$$K_{ar} = \frac{1}{R'_1 + R'_2} \approx \frac{1}{R'_1} \quad (\text{puisque } R'_2 \approx 0).$$

Le schéma de droite de la figure IV 13 montre que le flux thermique échangé avec l'environnement à T_a s'écrit

$$\dot{Q}_a = K (T_p - T_a).$$

On en déduit le **rendement instantané** η , égal au rapport de l'énergie utile \dot{Q}_u sur l'éclairement solaire G^* reçue par le capteur

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{G^*} = \frac{\dot{Q}^* - \dot{Q}_a}{G^*} = (\tau_c^* \cdot \alpha_p^*) - \frac{\dot{Q}_a}{G^*}$$

On appelle *rendement optique* du capteur, que l'on note v^* , le produit du coefficient de transmission solaire τ_c^* de la vitre par le coefficient d'absorption solaire α_p^* de la surface absorbante.

Finalement le rendement instantané en régime permanent du capteur plan s'écrit

$$\eta = v^* - K \frac{T_p - T_a}{G^*}$$

Si on considère que le rendement optique v^* du capteur est constant ainsi que la conductance globale K , on obtient la *droite de rendement* représentée à la figure IV 14.

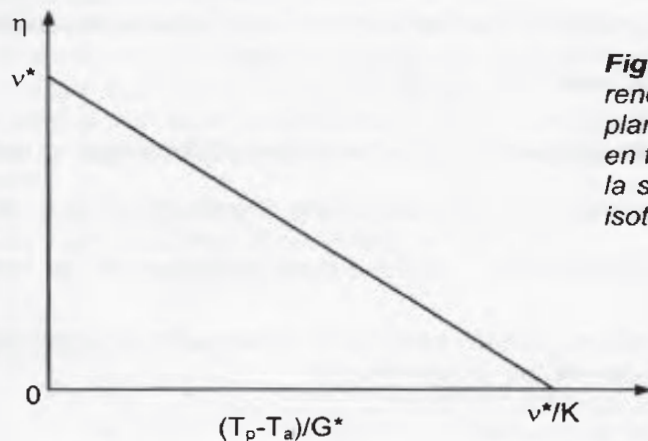


Figure IV.14 – Droite de rendement d'un capteur solaire plan. Le rendement η est donné en fonction de la température de la surface absorbante supposée isotherme à T_p .

Le rendement sera d'autant meilleur que la température de l'absorbeur sera proche de la température de l'air ambiant. C'est la raison pour laquelle il ne faut pas rechercher de hautes températures du fluide caloporteur avec les capteurs solaires plans. Ils apparaissent donc parfaitement adaptés au chauffage basse température que l'on rencontre dans l'habitat avec les planchers chauffants. C'est le cas du PSD (Plancher Solaire Direct) pour lequel des capteurs solaires plans chauffent l'eau qui circule dans le sol de la maison.

* Application IV.5

Déterminons le rendement instantané d'un capteur solaire plan avec les données suivantes

Situation Bordeaux ($\varphi=44^{\circ}50'$)

Date 17 novembre, 11 h TSV

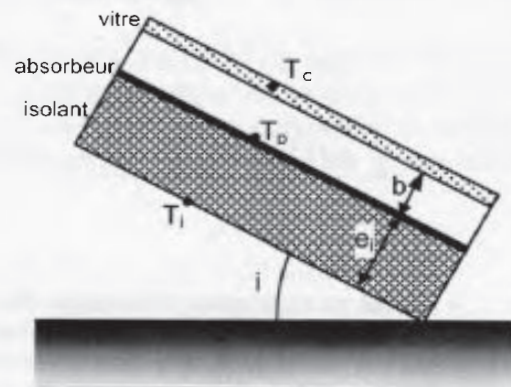
Météorologie

- ciel clair et pur
- température ambiante $T_a=10^{\circ}\text{C}$
- vent parallèle au capteur de vitesse $w=4\text{ m/s}$

Sur le capteur

- orientation plein sud
- angle d'inclinaison $i=45^{\circ}$
- albédo $a^*=0,2$
- température de l'absorbeur $T_p=60^{\circ}\text{C}$
- coefficients d'émission infrarouge
 - de l'absorbeur $\varepsilon_p=0,95$
 - de la vitre $\varepsilon_c=0,83$
- rendement optique $\nu^*=0,76$
- isolant épaisseur $e_i=5\text{ cm}$, conductivité thermique $\lambda_i=0,045\text{ W/m.K}$, $T_i \approx T_a$
- distance absorbeur-vitre $b=2,5\text{ cm}$

Un calcul similaire à celui effectué au chapitre III permet de dresser le tableau ci-dessous afin de déterminer l'éclairement solaire global G^* reçue par le capteur



$n = 321$	$\delta = -19,6^{\circ}$	$\omega = -15^{\circ}$
$a = -15,5^{\circ}$	$h = 24,1^{\circ}$	$\omega_0 = 69,3^{\circ}$
$I^* = 817\text{ W/m}^2$		$G_h^* = 404\text{ W/m}^2$
$S_h^* = 334\text{ W/m}^2$	$D_h^* = 70\text{ W/m}^2$	
$R_s = 2,23$	$R_D = 1,02$	$R_G = 2,02$
$S^* = 744\text{ W/m}^2$	$D^* = 71\text{ W/m}^2$	$G^* = 815\text{ W/m}^2$

Procédons maintenant au calcul de la conductance globale K du capteur

- Calcul du coefficient d'échange thermique par convection naturelle h_{c1} entre la plaque et la vitre

On commence par calculer le nombre de Grashof, nombre sans dimension caractéristique

$$\text{du phénomène de convection naturelle } Gr = \rho_a^2 \frac{g}{\bar{T}} \frac{(T_p - T_c) b^3}{\mu_a^2}$$

où \bar{T} représente la température moyenne de l'air confiné entre l'absorbeur et la vitre. On

pose $\bar{T} = \frac{T_p + T_c}{2}$ La température de la vitre étant inconnue, il faut la choisir

arbitrairement ce qui permet de déterminer \bar{T} puis les caractéristiques de l'air confiné (ρ_a , μ_a , λ_a) et le nombre de Grashof.

Choisissons $T_c = 16^\circ\text{C}$, ce qui donne $\bar{T} = (60+16)/2 = 38^\circ\text{C}$ et par suite (en interpolant dans la table donnant les caractéristiques de l'air cf. annexe A)

$$\rho_a = 1,135 \text{ kg/m}^3, \mu_a = 18,8 \cdot 10^{-6} \text{ Pa.s}, \lambda_a = 26,3 \cdot 10^{-3} \text{ W/m.K.}$$

On en déduit la valeur du nombre de Grashof

$$Gr = 1,135^2 \frac{9,81}{(273 + 38)} \frac{(60 - 16) \times 0,025^3}{(18,8 \cdot 10^{-6})^2} = 7,9 \cdot 10^4$$

Dans le cadre de la géométrie étudiée, il existe une corrélation empirique reliant Gr au nombre de Nusselt Nu où l'angle i est exprimé en degrés (cf. Annexe D)

$$Nu = [0,06 + 3 \cdot 10^{-4} (90 - i)] Gr^{0,33} = [0,06 + 3 \cdot 10^{-4} (90 - 45)] (7,9 \cdot 10^4)^{0,33} = 3,04$$

On en déduit h_{c1}

$$h_{c1} = \frac{Nu \lambda_a}{b} = \frac{3,04 \times 26,3 \cdot 10^{-3}}{0,025} = 3,2 \text{ W/m}^2.\text{K.}$$

- Calcul du coefficient d'échange thermique par rayonnement h_{r1}

Compte tenu du fait que b est le plus souvent très petit devant les autres dimensions du capteur, on considère que l'échange radiatif a lieu entre deux plans infinis. En appelant Q_{r1} la puissance échangée par rayonnement entre les deux surfaces planes, on a

$$Q_{r1} = h_{r1} (T_p - T_c) = \frac{\sigma (T_p^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \text{ équation qui permet d'exprimer } h_{r1} \text{ sous la forme}$$

$$h_{r1} = \frac{\sigma (T_p^2 + T_c^2) (T_p + T_c)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (333^2 + 289^2) (333 + 289)}{\frac{1}{0,95} + \frac{1}{0,83} - 1} = 5,45 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

- On en déduit $R_1 = 1/(h_{c1} + h_{r1}) = 1/(3,2 + 5,45) = 0,116^\circ\text{C}/(\text{W/m}^2)$.

- Calcul du coefficient d'échange thermique par convection entre la vitre et l'extérieur h_{c2}

Lorsqu'un vent souffle parallèlement au capteur il existe une corrélation empirique simple qui permet d'avoir une idée du coefficient d'échange par convection forcée en fonction de la composante w (en m/s) de la vitesse du vent parallèle au capteur

$$h_{c2} = 5,7 + 3,8 w = 5,7 + 3,8 \times 4 = 20,9 \text{ W/m}^2.\text{K.}$$

- Calcul du coefficient d'échange thermique par rayonnement h_{r2}

Il s'agit ici d'échanges radiatifs entre la vitre à T_c et le ciel à la température T_∞ que l'on peut calculer par la formule empirique donnée dans le texte

$$T_\infty = 0,0552 T_a^{1,5} = 0,0552 (273+10)^{1,5} = 263 \text{ K.}$$

En considérant le ciel comme un corps noir, la puissance échangée par rayonnement est donnée par

$$Q_{r2} = h_{r2} (T_c - T_a) = \epsilon_c \sigma (T_c^4 - T_\infty^4)$$

d'où l'on tire h_{r2}

$$h_{r2} = \frac{\epsilon_c \sigma (T_c^4 - T_\infty^4)}{T_c - T_a} = \frac{0,83 \times 5,67 \cdot 10^{-8} (289^4 - 263^4)}{16 - 10} = 17,2 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

- On en déduit $R_2 = 1/(h_{c2} + h_{r2}) = 1/(20,9 + 17,2) = 0,026^\circ\text{C}/(\text{W/m}^2)$.

- La conductance face avant du capteur s'écrit

$$K_{av} = 1/(R_1 + R_2) = 1/(0,116 + 0,026) = 7,04 \text{ W/m}^2.\text{K.}$$

- La conductance face arrière est réduite à la conductivité thermique si l'on considère que la température externe T_i de l'isolant est proche de la température ambiante T_a . D'où l'expression simple de la conductance arrière $K_{ar} = \lambda_i/e_i = 0,045/0,05 = 0,9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.
- La valeur de la conductance globale est déterminée en écrivant $K = K_{av} + K_{ar} = 7,04 + 0,9 = 7,94 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.
- Il reste à vérifier le choix effectué pour la température T_c de la vitre. Pour cela, on peut écrire, qu'en régime permanent, la somme des flux thermiques échangés par la vitre est nulle

$$(h_{c1} + h_{r1}) (T_c - T_p) + (h_{c2} + h_{r2}) (T_c - T_a) = 0$$

ou encore en utilisant les résistances thermiques

$$\frac{T_c - T_p}{R_1} + \frac{T_c - T_a}{R_2} = 0$$

et par suite

$$T_c = \frac{R_1 T_a + R_2 T_p}{R_1 + R_2} = \frac{0,116 \times 10 + 0,026 \times 60}{0,116 + 0,026} = 19^\circ \text{C}$$

Cette valeur est proche des 16°C choisis et l'on peut se contenter de prendre pour K la valeur de $7,9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

En recommençant le calcul, avec $T_c = 19^\circ \text{C}$, on trouve pour la conductance thermique globale $K = 7,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Finalement, le rendement instantané s'écrit

$$\eta = \nu^* - K \frac{T_p - T_a}{G^*} = 0,76 - 7,8 \frac{60 - 10}{816} = 0,28$$

Remarquons que, toute chose étant égale par ailleurs, si l'absorbeur atteint la température de $89,5^\circ \text{C}$, le rendement devient nul. À cette température de plaque, les pertes thermiques du capteur deviennent égales aux apports solaires.

2.3 Influence de la température d'entrée du fluide caloporteur

Il paraît plus judicieux de chercher à déterminer le rendement du capteur en fonction, non pas de la température T_p de l'absorbeur, mais plutôt en fonction de la température T_{fe} du fluide à l'entrée du capteur. Dans le paragraphe précédent on a considéré la surface absorbante isotherme à T_p . En réalité la plaque est soumise à un champ de température non uniforme, constant en régime permanent.

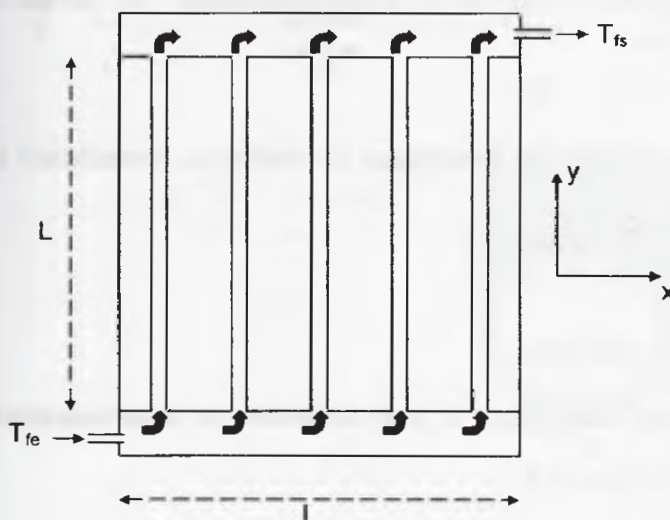


Figure IV.15 – Schéma du capteur plan étudié.

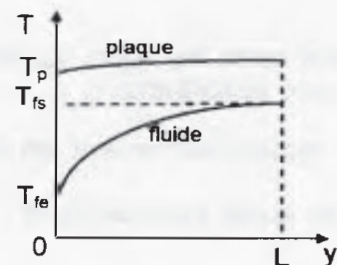


Figure IV.16 – Évolution de la température de la plaque et du fluide caloporteur en fonction de la variable y .

En première approximation, on peut négliger les variations de la température suivant y et z (cf. fig. IV 15 et 16) et l'on peut alors écrire

$$\frac{\partial T_p}{\partial y} = \frac{\partial T_p}{\partial z} = 0.$$

Cela revient à considérer que la température de la plaque ne dépend que de x . Néanmoins on la considèrera constante pour la partie située au dessus d'une tuyauterie d'eau, c'est-à-dire sur une longueur D_e (cf. fig. IV 17). La température de la plaque n'est donc supposée varier que sur la longueur $2.w$ correspondant à l'intervalle séparant deux tuyauteries. Pour déterminer l'évolution de cette température, on écrit l'équation de la chaleur relative à un élément de plaque, d'épaisseur δ , de largeur dx et de longueur L situé à la cote x entre deux tuyauteries (cf. fig. IV 18)

$$\rho_p \cdot c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \lambda_p \cdot \Delta T_p + \frac{\dot{Q}_u}{\delta} = 0$$

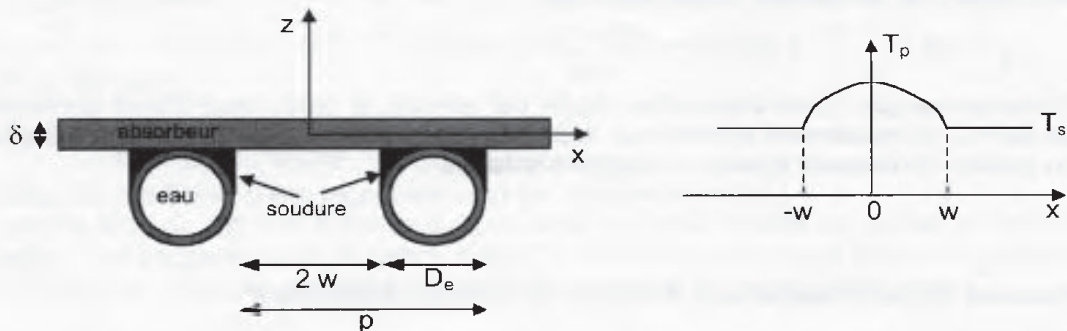
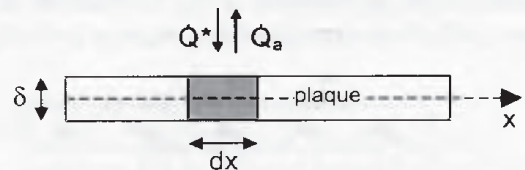


Figure IV.17 – Coupe du capteur et évolution de la température de la plaque en fonction de la variable x .

Figure IV.18 – Schéma servant au calcul du bilan thermique d'un élément de plaque de longueur dx . En régime permanent $\dot{Q}_u = \dot{Q}^* - \dot{Q}_a$.



Dans cette équation, λ_p représente la conductivité thermique du matériau constituant la plaque absorbante¹

En régime permanent, on a

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = 0$$

mais aussi, puisque $\dot{Q}_i = 0$

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}^* - \dot{Q}_a.$$

La température T_p étant indépendante des variables y et z , le laplacien de la température s'écrit

¹ Le produit $\rho_p \cdot c_p$ est lui aussi relatif au matériau constituant l'absorbeur; ρ_p est sa masse volumique et c_p sa chaleur massique. En régime permanent le membre de gauche de l'équation disparaît et ce groupement n'intervient pas.

$$\Delta T_p = \frac{d^2 T_p}{dx^2}$$

D'autre part, le flux thermique perdu avec l'environnement s'écrit

$$\dot{Q}_a = K (T_p - T_a)$$

où K est la conductance globale du capteur que l'on suppose, en première approximation, constante.

L'équation de la chaleur devient alors

$$\frac{d^2 T_p}{dx^2} = \frac{K}{\lambda_p \cdot \delta} \left[T_p - \left(T_a + \frac{\dot{Q}^*}{K} \right) \right]$$

La résolution de cette équation différentielle du second ordre nécessite la connaissance de deux conditions aux limites.

Par raison de symétrie on a $\left. \frac{dT_p}{dx} \right|_{x=0} = 0$.

D'autre part, on fait l'hypothèse que la température T_s de la soudure est égale à la température T_p locale supposée constante sur la longueur D_e correspondant au diamètre extérieur de la conduite (cf. fig. IV 17); ce qui s'écrit

$$T_p = T_s \text{ pour } x = w$$

En posant

$$m^2 = \frac{K}{\lambda_p \cdot \delta},$$

la solution s'écrit

$$T_p(x) = T_a + \frac{\dot{Q}^*}{K} + \left[T_s - \left(T_a + \frac{\dot{Q}^*}{K} \right) \right] \frac{\text{ch}(m \cdot x)}{\text{ch}(m \cdot w)}$$

le terme $\text{ch}()$ représentant la fonction cosinus hyperbolique.

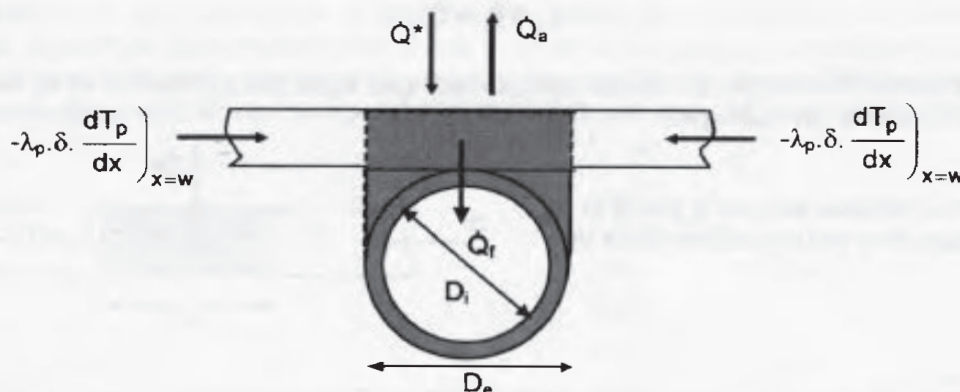


Figure IV.19

Cherchons à présent à déterminer la puissance thermique \dot{Q}_r absorbée par le fluide caloporteur par mètre de longueur de tuyauterie. Cette puissance est égale à l'apport

solaire \dot{Q}^* diminué des pertes thermiques \dot{Q}_a et augmenté des apports par conduction thermique (cf. fig.IV 19). L'équation de bilan en régime permanent s'écrit

$$\dot{Q}_f = \left[\dot{Q}^* - \dot{Q}_a \right] D_e - 2 \lambda_p \delta \left. \frac{dT_p}{dx} \right|_{x=w}$$

Posons
$$\eta_w = \frac{\text{th}(m.w)}{m.w}$$

où $\text{th}()$ représente la fonction tangente hyperbolique.

On obtient alors

$$\dot{Q}_f = \left[\dot{Q}^* - K (T_s - T_a) \right] (D_e + 2 w \eta_w)$$

Exprimons cette quantité en fonction, non pas de la température T_s de la soudure, mais en fonction de la température T_f du fluide.

Notons

χ le périmètre mouillé de la conduite $\chi = \pi.D_i$ où D_i est le diamètre intérieur de la conduite,

h_c le coefficient d'échange par convection entre la paroi et le fluide.

On obtient alors

$$\dot{Q}_f = \left[\dot{Q}^* - K (T_f - T_a) \right] p F$$

avec

$$p = D_e + 2 w$$

pas entre tuyauteries,

et

$$F = \frac{1}{\frac{p}{(D_e + 2.w.\eta_w)} + \frac{p.K}{\chi.h_c}}$$

appelé *rendement d'irrigation*.

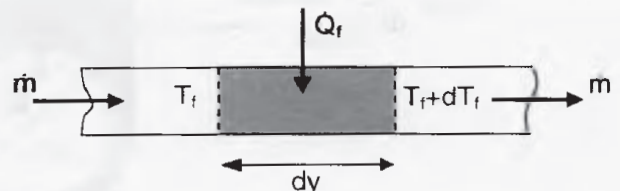
Ce facteur correspond au rapport de la résistance thermique plaque absorbante-air ambiant sur la résistance thermique fluide-air ambiant.

Considérons à présent un volume élémentaire de fluide (cf. fig.IV.20). L'équation de bilan thermique en régime permanent s'écrit

$$\dot{m} c_p dT_f = \dot{Q}_f dy$$

où \dot{m} est le débit massique du fluide caloporteur (en kg/s par conduite) et c_p la capacité calorifique du fluide (en kJ/kg.K).

Figure IV.20 – Schéma servant à écrire le bilan thermique d'un volume élémentaire de fluide.



En remplaçant \dot{Q}_f par son expression en fonction de T_f , on trouve

$$\frac{dT_f}{T_f - T_a - \frac{\dot{Q}^*}{K}} = -\frac{p F K}{\dot{m} c_p} dy$$

Les conditions aux limites s'écrivent $T_f = T_{fe}$ pour $y = 0$ et $T_f = T_{fs}$ pour $y = L$.

Soit
$$\dot{M} = \frac{\dot{m}}{p L}$$

le débit massique par unité de surface de capteur (kg/s.m^2).

On trouve alors
$$\frac{T_{fs} - T_a - \frac{\dot{Q}^*}{K}}{T_{fe} - T_a - \frac{\dot{Q}^*}{K}} = \exp\left(-\frac{F K}{\dot{M} c_p}\right)$$

expression qui permet de connaître la température de sortie T_{fs} du fluide caloporteur en fonction de sa température d'entrée T_{fe} .

La puissance fournie au fluide par mètre carré de capteur s'écrit

$$\dot{Q}_u = \dot{M} c_p (T_{fs} - T_{fe}).$$

Posons
$$F_t = \frac{\dot{M} c_p}{K} \left[1 - \exp\left(-\frac{F K}{\dot{M} c_p}\right) \right]$$

appelé *facteur de transfert thermique*.

Ce facteur représente le rapport du flux thermique réel reçu par le fluide sur celui qui serait récupéré si la surface absorbante était isotherme à T_{fe} . Ce facteur sera proche de l'unité dans les cas de débits importants et un fonctionnement de capteur à basse température (capteurs de piscine par exemple).

On a donc

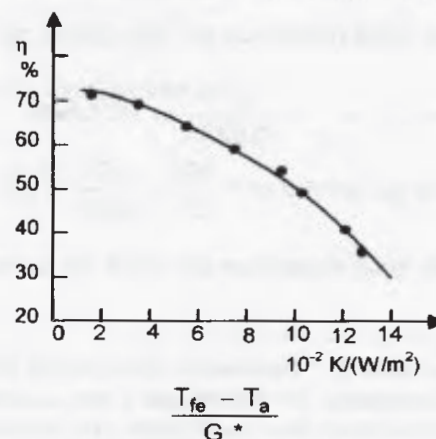
$$\dot{Q}_u = F_t [\dot{Q}^* - K (T_{fe} - T_a)]$$

d'où le rendement instantané

$$\eta = F_t \left(\nu^* - K \frac{T_{fe} - T_a}{G^*} \right)$$

En considérant F_t et K constants, on retrouve la droite de rendement vue précédemment. En réalité, le facteur de transfert thermique F_t et la conductance thermique K varient avec la température de fonctionnement du capteur ainsi qu'avec les conditions climatiques. Il s'ensuit une déviation de la courbe de rendement par rapport à la droite théorique (cf. fig.IV.21).

Figure IV.21 – Courbe expérimentale de rendement d'un capteur plan.



* Application IV.6

Un capteur solaire plan possède les caractéristiques suivantes

- surface absorbante en cuivre, longueur $L=1,5$ m, largeur $l=0,75$ m, épaisseur $\delta=1$ mm
- rendement optique $\nu^*=0,85$
- tuyauteries pas $p=37,5$ mm, diamètres $D_e=14$ mm, $D_i=12$ mm
- débit d'eau $\dot{V}=70$ l/h, température à l'entrée $T_{fe}=40^\circ\text{C}$
- conductance globale $K=6,55$ W/m².K

Calculons le rendement instantané avec les données suivantes

- température ambiante extérieure $T_a=10^\circ\text{C}$
- éclairement solaire global $G^*=635$ W/m²

Dans l'expression du rendement $\eta = F_t \left(\nu^* - K \frac{T_{fe} - T_a}{G^*} \right)$ il ne manque que la

connaissance du facteur de transfert thermique F_t .

On procède au calcul des grandeurs suivantes

- $m^2 = \frac{K}{\lambda_p \cdot \delta} = \frac{6,55}{384 \times 10^{-3}} = 17,06 \Rightarrow m = 4,13$
- $w = \frac{p - D_e}{2} = 11,75$ mm
- $\eta_w = \frac{\text{th}(m \cdot w)}{m \cdot w} = \frac{\text{th}(4,13 \times 0,01175)}{4,13 \times 0,01175} = 0,9992$
- le périmètre mouillé $\chi = \pi \cdot D_i = \pi \times 12 = 37,7$ mm
- le coefficient d'échange thermique par convection forcée h_c il faut commencer par trouver le type d'écoulement (laminaire ou turbulent) en calculant le nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho \cdot c \cdot D_i}{\mu} \quad \rho \text{ et } \mu \text{ étant respectivement la masse volumique et la viscosité dynamique de}$$

l'eau à la température de mélange $\bar{T}_f = \frac{T_{fe} + T_{fs}}{2}$ En choisissant arbitrairement la

température T_{fs} égale à 50°C (choix qu'il faudra vérifier à la fin) on trouve $\bar{T}_f = 45^\circ\text{C}$.

Pour cette température les caractéristiques de l'eau sont les suivantes (cf. Annexe B)

$$\rho = 990 \text{ kg/m}^3, \quad c_p = 4175 \text{ J/kg.K} \quad \mu = 0,602 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s} \quad \lambda = 0,639 \text{ W/m.K}$$

d'où $Re = \frac{990 \times 0,0086 \times 0,012}{0,602 \cdot 10^{-3}} = 170$. Cette valeur étant bien inférieure à 2000, on peut

affirmer que l'écoulement est laminaire. Dans ce cas, en supposant un flux thermique \dot{Q}_u uniforme, on a la relation simple suivante¹

$$h_c = 4,36 \frac{\lambda}{D} = 4,36 \frac{0,639}{0,012} = 232 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$F = \frac{1}{\frac{p}{(D_e + 2 \cdot w \cdot \eta_w)} + \frac{p \cdot K}{\chi \cdot h_c}} = \frac{1}{\frac{37,5}{(14 + 2 \times 11 \times 0,9992)} + \frac{37,5 \times 6,55}{37,7 \times 232}} = 0,934$$

- le débit massique par tuyauterie $\dot{m} = \frac{\rho \cdot \dot{V}}{n_t}$ où n_t est le nombre de tuyauteries.

$$\text{Ici } n_t = \frac{l}{p} = \frac{0,75}{0,0375} = 20 \text{ tubes}$$

$$\text{ce qui donne } \dot{m} = \frac{990}{20} \times \frac{0,07}{3600} = 9,6 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s.}$$

- le débit massique par unité de surface de capteur $\dot{M} = \frac{\dot{m}}{p \cdot L} = \frac{9,64 \cdot 10^{-4}}{0,0375 \times 1,5} = 0,0171 \text{ kg/s.m}^2$

¹ Cf. Annexe D *Éléments d'échanges thermiques, Convection*. Notons que les valeurs trouvées sont indicatives. En thermique il est courant de devoir se contenter d'une précision de $\pm 20\%$ dans la détermination des coefficients de convection.

- le facteur de transfert thermique

$$F_t = \frac{\dot{M} c_p}{K} \left[1 - \exp\left(-\frac{F K}{\dot{M} c_p}\right) \right] = \frac{0,0171 \times 4174}{6,55} \left[1 - \exp\left(-\frac{0,934 \times 6,55}{0,0171 \times 4174}\right) \right] = 0,895$$

Finalement le rendement instantané s'élève à

$$\eta = F_t \left(v^* - K \frac{T_{fe} - T_a}{G^*} \right) = 0,895 \left(0,85 - 6,55 \frac{40 - 10}{635} \right) = 48,4 \%$$

et la droite de rendement s'écrit

$$\eta = 0,76 - 5,86 \frac{T_{fe} - T_a}{G^*}$$

Vérifions à présent le choix effectué pour la température du fluide en sortie capteur $T_{fs}=50^\circ\text{C}$. On doit vérifier l'égalité suivante

$$\dot{Q}_u = \rho \dot{V} c_p (T_{fs} - T_{fe}) = \eta G^* \Rightarrow T_{fs} = T_{fe} + \eta \frac{G^*}{\rho \dot{V} c_p} = 40 + 0,484 \frac{635}{990 \times \frac{0,07}{3600} \times 4175} = 43,8^\circ\text{C}.$$

Il aurait donc fallu déterminer les caractéristiques, non pas à 45°C , mais à $(40+43,8)/2=42^\circ\text{C}$ environ. La précision de tous ces calculs ne nécessite pas de les reprendre pour un écart aussi faible.

Déterminons l'évolution du rendement instantané sur une journée, en considérant le facteur de transfert thermique F_t , le rendement optique v^* , la conductance globale K , la température du fluide à l'entrée T_{fe} constants

$F_t=0,895$, $v^*=0,85$, $K=6,55 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, $T_{fe}=40^\circ\text{C}$.

Des relevés, heure par heure, de l'éclairement global G^* et de la température ambiante T_a ont été effectués durant une journée. Le tableau ci-dessous donne les résultats obtenus ainsi que le rendement instantané η

$$\eta = 0,76 - 5,86 \frac{40 - T_a}{G^*}$$

heure TSV	G^* $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	T_a $^\circ\text{C}$	η %	$\eta \cdot G^*$
7-8	14	2	0	0
8-9	290	3	1	2,9
9-10	330	4	12	39,6
10-11	614	5	43	264,0
11-12	812	9	54	438,5
12-13	936	10	57	533,5
13-14	979	11	59	577,6
14-15	936	11	59	552,2
15-16	60	10	0	0
16-17	452	10	37	167,2
17-18	30	7	0	0
18-19	20	5	0	0
Σ	5473			2576

On peut en déduire un rendement moyen sur la journée considérée

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_i \eta_i G_i^*}{\sum_i G_i^*} = \frac{2576}{5473} = 47 \%$$

3. RÉGIME TRANSITOIRE

3.1 Position du problème

On a vu au paragraphe 2 que l'équation de bilan thermique du capteur s'écrit

$$\dot{Q}^* = \dot{Q}_u + \dot{Q}_a + \dot{Q}_t$$

où \dot{Q}_t représente la puissance thermique provenant du refroidissement ou bien du réchauffement du capteur. Évidemment en régime permanent cette quantité est nulle. Mais ce n'est plus le cas par exemple au démarrage de l'installation lorsque le système est "froid". Les premiers rayons de soleil vont servir à mettre en température l'installation. Lorsque ce sera fait, l'énergie solaire pourra être transférée au fluide caloporteur avec un rendement que nous avons défini au paragraphe précédent.

En notant m_i la masse d'un élément constitutif du capteur et c_i sa chaleur massique, on peut écrire

$$\dot{Q}_t = \sum_i m_i \cdot c_i \cdot \frac{dT_i}{dt}$$

Le problème apparaît complexe car chaque élément constitutif est a priori à une température différente et de plus variable dans le temps.

3.2 Étude simplifiée

Reprenons le capteur que nous avons étudié au paragraphe précédent et faisons les hypothèses suivantes, supposées vérifiées à tout instant durant la mise en température et le refroidissement du capteur

- le fluide n'est pas en mouvement. L'eau se trouvant dans les tubes est immobile et donc aucune énergie utile n'est transférée à un ballon de stockage par exemple. On peut donc écrire $\dot{Q}_u = 0$,
- à un instant donné, le capteur est isotherme à la température T_p sauf la vitre qui est à la température uniforme T_c ,
- les pertes thermiques par la face arrière du capteur sont négligeables, ce qui revient à écrire $K_{ar} \approx 0$.

Le bilan du capteur (hors vitre) s'écrit à chaque instant

$$\dot{Q}^* = (M.C)_p \frac{dT_p}{dt} + \frac{T_p - T_c}{R_1}$$

expression dans laquelle le terme $(M.C)_p$ représente la somme des capacités thermiques de la plaque, du fluide caloporteur présent dans les tubes et de l'isolant.

Le bilan de la vitre au même instant donne

$$0 = (m.c)_c \frac{dT_c}{dt} + \frac{T_c - T_p}{R_1} + \frac{T_c - T_a}{R_2}$$

dans la mesure où on néglige son coefficient d'absorption solaire α_c^* . Dans cette dernière relation, le terme $(m.c)_c$ représente la capacité thermique de la vitre. L'équation de continuité du flux thermique permet d'écrire

$$\frac{T_p - T_a}{R_{av}} = \frac{T_c - T_a}{R_2}$$

avec, compte tenu de l'hypothèse $R_{ar} = 0$, $R_{av} = R = 1/K$. En dérivant par rapport au temps cette égalité, on trouve

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{K \cdot R_2} \cdot \frac{dT_c}{dt}$$

On appelle *capacité calorifique effective* la quantité suivante

$$(M.C)_{eff} = (M.C)_p + (m.c)_c K R_2.$$

Plus cette quantité est élevée plus grande est l'inertie thermique du capteur. Une variation de l'éclairement se fera sentir avec un retard plus grand si l'inertie thermique est élevée et inversement.

Les égalités précédentes permettent d'écrire l'équation régissant l'évolution de la température du capteur (hormis la vitre) en fonction du temps

$$(M.C)_{eff} \frac{dT_p}{dt} = \dot{Q}^* - K (T_p - T_a)$$

En intégrant sur un intervalle de temps Δt l'équation précédente et en supposant que \dot{Q}^* est constant sur cet intervalle, on trouve

$$\frac{T_p(t + \Delta t) - T_a - \frac{\dot{Q}^*(t)}{K}}{T_p(t) - T_a - \frac{\dot{Q}^*(t)}{K}} = \exp\left(-\frac{K \cdot \Delta t}{(M.C)_{eff}}\right)$$

Ce résultat permet de suivre l'évolution de la température du capteur avec un pas Δt . Le capteur, supposé initialement à la température ambiante T_a , va s'échauffer pour atteindre la température de fonctionnement déterminée. Il va alors fournir de l'énergie au système grâce à la mise en circulation du fluide caloporteur, tout en conservant une température constante; c'est le fonctionnement en régime permanent. Lorsque le soleil baisse sur l'horizon, \dot{Q}^* diminue. Quand la température du capteur descend en-dessous de la température de fonctionnement, le circulateur s'arrête, le capteur solaire ne fournit plus d'énergie; il se refroidit lentement pour tendre vers la température ambiante T_a .

* Application IV.7

Nous reprenons les caractéristiques du capteur de l'exemple précédent à savoir

- longueur = 1,5 m
 - largeur = 0,75 m
 - conductance globale $K=6,55 \text{ W/K.m}^2$
- mais aussi avec les données supplémentaires suivantes .
- résistance thermique vitre-air ambiant $R_2=0,024 \text{ K/(W/m}^2\text{)}$
 - isolant polyuréthane, épaisseur $e_i=70 \text{ mm}$
 - température de fonctionnement 45°C

Le fluide est mis en mouvement dès que la température de fonctionnement est atteinte. Par la suite, l'énergie en excès correspondant à \dot{Q}_u , est envoyée vers un ballon où elle est stockée.

Cherchons à déterminer l'évolution dans le temps de la température du capteur supposé isotherme à T_p (hormis la vitre que nous continuons à considérer isotherme à T_c).

Commençons par déterminer la capacité calorifique effective (en J/K.m²) qui est la somme des capacités calorifiques des différents éléments

$$(m.c_p)_{\text{plaque+tubes}} = [1,5 \times 0,75 \times 10^{-3} + 20 \times 1,5 \times \pi \cdot (14^2 - 12^4) 10^{-6} / 4] \cdot 8900 \times 398 = 8325 \text{ J/K}$$

$$(m.c_p)_{\text{fluide}} = 20 \times 1,5 \times \pi (12 \cdot 10^{-3})^2 / 4 \times 990 \times 4174 = 14020 \text{ J/K}$$

$$(m.c_p)_{\text{isolant}} = 1,5 \times 0,75 \times 0,075 \times 30 \times 1600 = 4050 \text{ J/K}$$

On en déduit

$$(M.C)_p = 8325 + 14020 + 4050 = 26395 \text{ J/K}$$

Pour la vitre en verre de 3 mm d'épaisseur, on obtient

$$(m.c_p)_c = 1,5 \times 0,75 \times 0,003 \times 2700 \times 840 = 7654,5 \text{ J/K}$$

D'où finalement

$$(M.C)_{\text{eff}} = (M.C)_p + (m.c)_c K R_2 = [26395 + 7654,5 \times 6,55 \times 0,024] / (1,5 \times 0,75) = 24532 \text{ J/K.m}^2$$

Choisissons un pas de 1 heure pour évaluer l'évolution de la température du capteur. Celle-ci est donnée par l'équation suivante

$$\frac{T_p(t+1h) - T_a - \frac{\dot{Q}^*(t)}{6,55}}{T_p(t) - T_a - \frac{\dot{Q}^*(t)}{6,55}} = \exp\left(-\frac{6,55 \times 3600}{24532}\right) = 0,38244$$

ou encore $T_p(t+1h) = 0,38244 T_p(t) + 0,61756 T_a + 0,094284 \dot{Q}^*(t)$.

Il reste à déterminer la valeur de \dot{Q}^* en fonction du temps. En considérant un rendement optique v^* constant, on peut écrire

$$\dot{Q}^*(t) = v^* \cdot G^*(t) = 0,85 G^*(t).$$

Le tableau ci-dessous donne en fonction du temps, heure par heure, l'éclairement global G^* , la puissance solaire absorbée \dot{Q}^* , la température ambiante T_a et la température T_p du capteur

Note les valeurs de G^* et T_a sont celles utilisées dans l'exemple précédent.

heure TSV	G^* W/m ²	\dot{Q}^* W/m ²	T_a °C	T_p °C
6-7	0	0	2	2
7-8	14	12	2	3
8-9	290	246	3	26
9-10	330	280	4	39
10-11	614	522	5	45
11-12	812	690	9	45
12-13	936	796	10	45
13-14	979	832	11	45
14-15	936	796	11	45
15-16	60	51	10	28
16-17	452	384	10	45
17-18	30	25	7	24
18-19	20	17	5	14
19-20	0	0	5	8
20-21	0	0	4	6
21-22	0	0	4	5

On constate que la période de fonctionnement du capteur s'étend de 10 h TSV à 17 h TSV avec une interruption entre 15 et 16 h due à une baisse de l'irradiation solaire et par suite un refroidissement du capteur. Dès que la température du fluide atteint une température en sortie qui est inférieure à 45°C, la circulation de l'eau est arrêtée et elle reprend dès que cette température tend à dépasser 45°C.

Dans cet exemple l'inertie thermique du capteur est faible et à une variation brusque de l'éclairement correspond une variation tout aussi rapide de la température du capteur

CHAPITRE V

APPLICATIONS À BASSE TEMPÉRATURE

Dans le chapitre précédent, on a détaillé l'élément clé qu'est le capteur solaire plan en énergétique solaire. Dans ce chapitre on va s'intéresser à son utilisation sachant que les températures que l'on peut obtenir avec un tel élément sont limitées. Le chauffage d'habitation ou de piscine et la fabrication d'eau chaude sanitaire (ECS) sont les applications privilégiées de l'énergie solaire basse température. On peut aussi envisager la climatisation de locaux, la distillation d'eau saumâtre, le séchage de produits agricoles..

1. GÉNÉRALITÉS

Tout système solaire comporte en général cinq éléments de base comme représenté à la figure suivante.

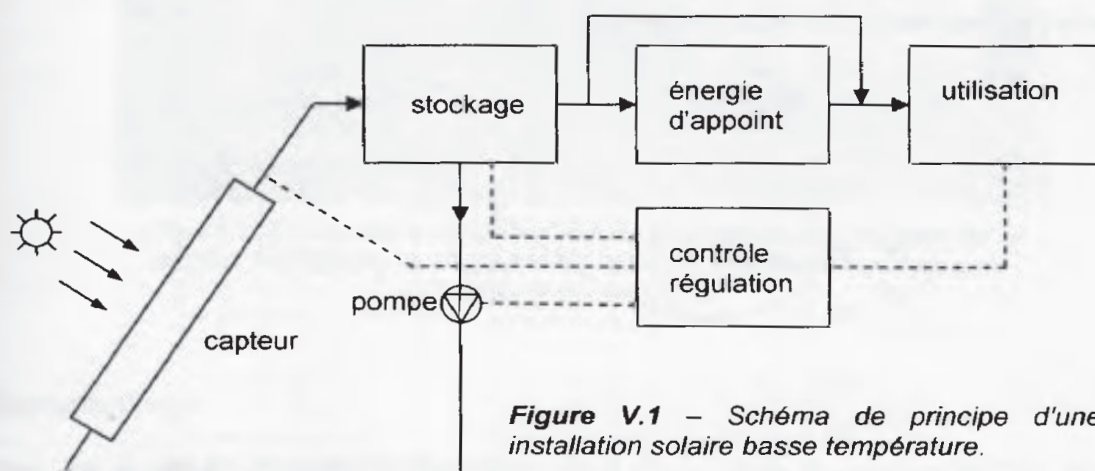


Figure V.1 – Schéma de principe d'une installation solaire basse température.

Pour certaines applications il n'est pas nécessaire d'utiliser et/ou de prévoir un système fournissant de l'énergie d'appoint.

Dans la plupart des cas les paramètres climatiques à prendre en compte sont l'irradiation solaire, les caractéristiques de l'air ambiant (température, humidité) et celles de l'eau du réseau.

Une des principales difficultés d'un tel système est la gestion du stockage de l'énergie. L'apport énergétique solaire est variable dans le temps alors que les besoins sont en général beaucoup plus réguliers. En fonction de ceux-ci la température du stockage varie dans le temps comme on peut s'en rendre compte dans l'application simple suivante.

* Application V.1

Déterminons l'évolution de la température de l'eau d'un ballon de stockage solaire. Le calcul est mené pour une journée de ciel clair durant laquelle la puissance solaire utile \dot{Q}_s est considérée évoluer sinusoïdalement avec un maximum à midi (TSV), ce qui revient à écrire

$$\dot{Q}_s = \dot{Q}_{s\max} \sin\left(\frac{\pi.t}{ddj}\right)$$

Les données sont les suivantes

- volume du stockage $V=300$ litres soit une masse $M=300$ kg
- la durée du jour $ddj=16$ h, le soleil se lève donc à 4 h
- la température initiale du stockage $T_{st0}=35^\circ\text{C}$
- la puissance solaire fournie par les capteurs à midi solaire $\dot{Q}_{s\max}=650$ W
- la puissance consommée est constante $\dot{Q}_c=310$ W.

L'équation régissant l'évolution de la température T_{st} du stockage s'écrit

$$M.c_p dT_{st} = (\dot{Q}_s - \dot{Q}_c) dt$$

$$\text{ou encore } dT_{st} = \frac{1}{M.c_p} \left[\dot{Q}_{s\max} \sin\left(\frac{\pi.t}{ddj}\right) - \dot{Q}_c \right] dt$$

La solution de cette équation différentielle du premier ordre est donnée par

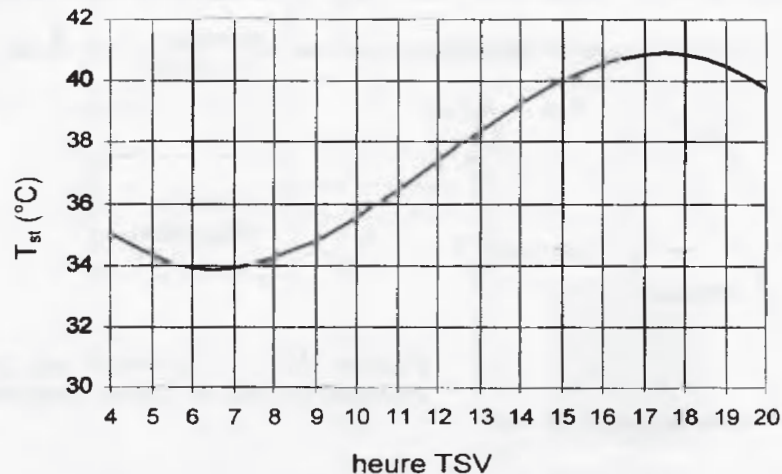
$$T_{st} = T_{st0} + \frac{1}{M.c_p} \left[\dot{Q}_{s\max} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi.t}{ddj}\right) \right) \frac{ddj}{\pi} - \dot{Q}_c.t \right]$$

avec $M.c_p=300 \times 4,175=1252,5$ kJ/K $=1252,5/3600=0,3479$ kWh/K

En utilisant comme unités le kW et l'heure, on obtient l'équation numérique suivante

$$T_{st} = 35 + \frac{1}{0,3479} \left[0,65 \left(1 - \cos\left(\frac{\pi.t}{16}\right) \right) \frac{16}{\pi} - 0,31.t \right]$$

dont le tracé est donné à la figure ci-dessous.



On y voit que la température du stockage commence par baisser, l'énergie prélevée étant supérieure à l'apport solaire. À partir de 6h30 TSV environ, cet apport solaire devient au contraire supérieur à la demande et la température T_{st} commence à croître pour atteindre un maximum vers 17h30. ($T_{st}=40,8^\circ\text{C}$). Le soleil venant de se coucher (20 h TSV) la température du stockage est alors de $39,8^\circ\text{C}$. Sans apport solaire, le stockage permettra de subvenir aux besoins (supposés constants par hypothèse) durant une durée Δt donnée par l'équation

$$M.c_p \Delta T_{st} = \dot{Q}_c \Delta t$$

soit

$$0,3479 \times (39,8 - 35) = 0,31 \Delta t, \text{ en prenant } 35^\circ\text{C} \text{ comme limite inférieure pour la température } T_{st}.$$

On obtient $\Delta t=5,4$ h.

Le stockage fournira l'énergie demandée jusqu'à $20+5,4-24=1,4$ h soit aux alentours de 1h20 du matin. Pour tenir jusqu'à la reprise de l'ensoleillement (soit 4 h du matin), il faut faire appel à une énergie d'appoint.

2. EAU CHAUDE SANITAIRE

Une des applications principales de l'énergie solaire basse température est le chauffage d'eau en vue d'un usage domestique. La température de l'eau chaude sanitaire (ECS) est en effet relativement réduite (60°C environ) et les capteurs solaires plans conviennent bien à ce type de production d'eau chaude.

On trouve principalement deux sortes d'installations : le système à thermosiphon (ou direct) et le système à circulation forcée. Notons qu'il n'est pas nécessaire, dans les régions fortement ensoleillées, de réaliser un système avec un matériel spécialisé. Un simple réservoir cylindrique placé en toiture et peint de couleur foncée peut servir à la fois de capteur solaire et de stockage d'eau chaude. Une arrivée d'eau froide et un départ d'eau chaude vers l'utilisation suffisent.



Figure V.2 - Capteurs solaires (Giordano) en toiture du bâtiment de la piscine municipale de Puylaurens (Tarn). Ils produisent l'eau chaude sanitaire des douches.

2.1 Système direct

Dans ce système, simplifié à l'extrême, c'est l'eau chaude sanitaire (ECS) qui circule elle-même dans le capteur. Cette circulation s'effectue par *thermosiphon* : l'eau en passant dans le capteur s'échauffe et, devenant moins dense, crée une dépression qui aspire l'eau plus dense qui entre dans le capteur. Il faut veiller cependant à ce que la perte de charge du circuit ne soit pas trop importante. Un tel système est schématisé à la figure V.3.

Ce système impose d'installer le ballon de stockage plus haut que le capteur¹. Celui-ci étant souvent placé en toiture, le ballon de stockage devient le point le plus haut de l'habitation ce qui n'est pas nécessairement recherché. Cette contrainte peut en effet être inacceptable pour des raisons esthétiques.

Pour éviter les pertes thermiques en ligne, il faut veiller à réduire les distances séparant les différents organes. Une bonne isolation thermique des canalisations est recommandée.

Il ne faut pas oublier de prévoir un vase d'expansion pour encaisser les variations de volume de l'eau du circuit avec la température.

¹ Si l'on se trouve dans l'impossibilité d'installer le stockage plus haut que le capteur, il est toujours possible de forcer la circulation à l'aide d'une pompe.

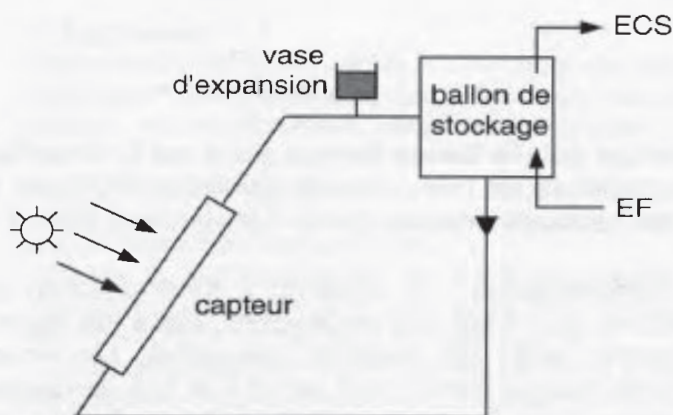


Figure V.3 – Schéma d'un système à thermosiphon. L'eau chaude sanitaire (ECS) prélevée en partie haute du stockage est remplacée par de l'eau froide (EF) en partie basse.

Un inconvénient de ce système est qu'on ne peut pas régler le débit du fluide caloporteur. Or, comme on l'a vu au chapitre IV, celui-ci influe sur la température T_{fs} de sortie du fluide caloporteur et par suite sur le rendement de l'installation.

Un tel système a pour avantage principal sa simplicité mais on doit faire attention au risque d'entartrage des canalisations qui sont parcourues par de l'eau ne pouvant être traitée. Pour cette même raison il faut veiller à vidanger le circuit lors des périodes de gel. Si ces contraintes sont trop gênantes, il faut prévoir un échangeur de chaleur dans le ballon de stockage. Un échangeur aura un bon rendement si le débit qui le traverse est suffisamment élevé. Or la circulation par thermosiphon ne peut fournir des débits élevés ce qui limite l'efficacité de l'échangeur.

2.2 Système à circulation forcée

Dans ce système, l'eau qui circule dans le capteur est différente de l'eau chaude sanitaire. On peut donc traiter le fluide caloporteur avec un antigel, un anticorrosif, un antifongique... En contrepartie, un échangeur de chaleur est nécessaire.

Un avantage de ce système est la possibilité d'obtenir dans le ballon de stockage une stratification des couches d'eau à températures différentes, les couches les plus chaudes étant bien sûr en partie haute.

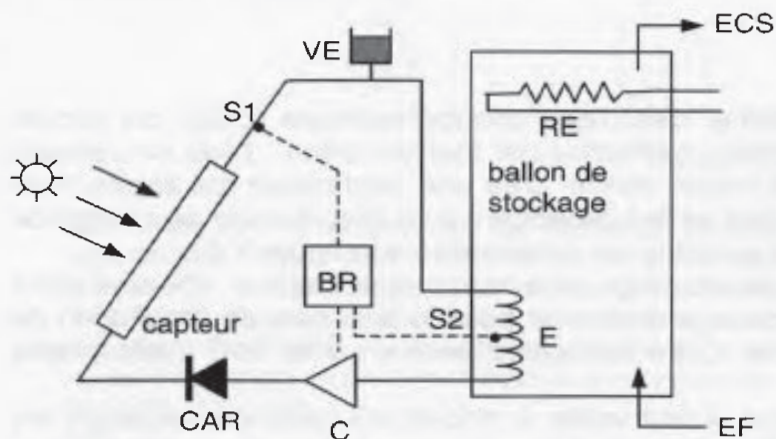


Figure V.4 – Système à circulation forcée.

BR	boîtier de régulation
C	circulateur (pompe)
CAR	clapet anti-retour
E	échangeur de chaleur
ECS	eau chaude sanitaire
EF	eau froide
RE	résistance électrique
S1	sonde de température
S2	sonde de température
VE	vase d'expansion

Si une énergie d'appoint s'avère nécessaire, elle devra être apportée en partie haute du stockage. On peut installer ou utiliser une chaudière déjà existante en la plaçant en aval de l'installation solaire. Elle sert à remonter la température de l'eau chaude du ballon selon les besoins.

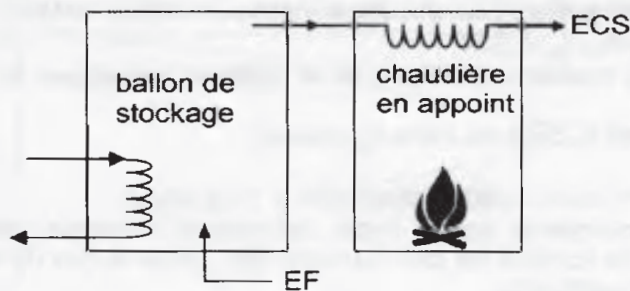


Figure V.5 – Schéma d'installation d'une chaudière en appoint d'un système solaire.

Dans tous les cas une étude économique s'avère nécessaire pour dimensionner la batterie de capteurs ainsi que la chaudière d'appoint, dans le cas d'une création complète d'un système de chauffage.

* Application V.2

Un système solaire fournissant de l'eau chaude sanitaire a les caractéristiques ci-dessous.

Géographie

- lieu d'implantation Toulouse
- ciel moyennement troublé
- albédo $a^*=0,3$

Eau chaude sanitaire

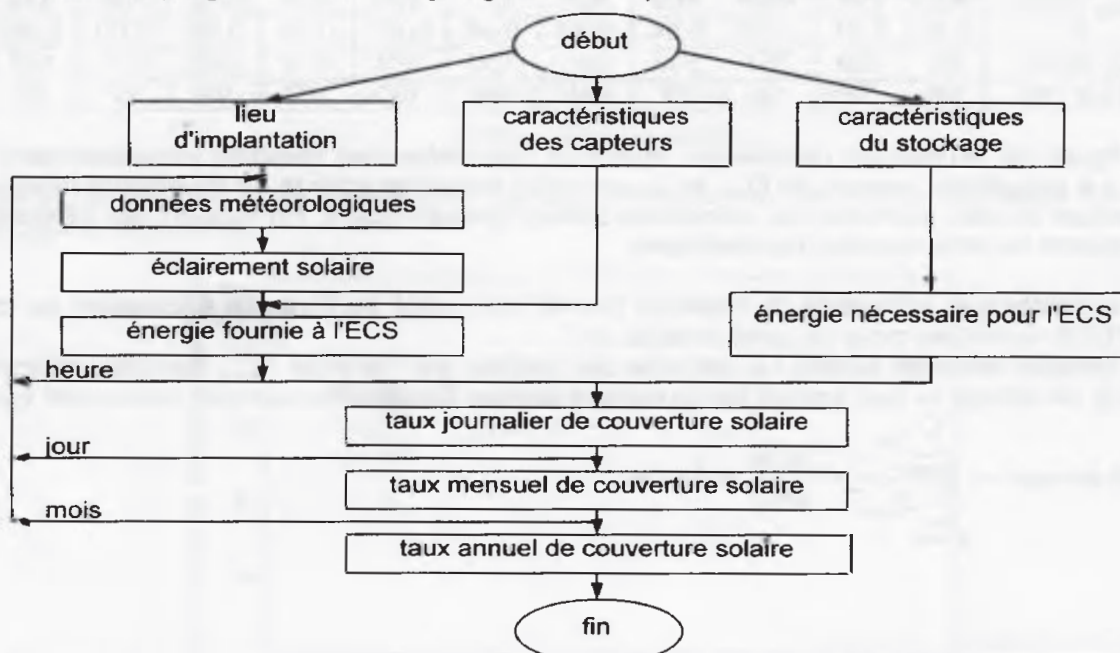
- volume utile du ballon de stockage $V_s=200$ litres,
- température maintenue à $T_s=60^\circ\text{C}$,
- consommation journalière d'ECS égale à celle du ballon
- coefficient de déperdition volumique du ballon $K_s=10 \text{ W/m}^3.\text{K}$

Capteurs solaires

- surface $S_c = 6 \text{ m}^2$
- orientation $i=45^\circ$, $\gamma=0^\circ$
- droite de rendement $\eta = 0,79 - 5,81 (T_e - T_a)/G^*$

où T_a est la température de l'air ambiant.

On note Q_{ecs} l'énergie nécessaire pour chauffer l'eau chaude sanitaire et Q_s l'énergie solaire récupérée par l'eau de stockage. On cherche à déterminer le taux de couverture solaire TCS correspondant au rapport entre l'apport solaire et les besoins réels soit $\text{TCS}=Q_s/Q_{\text{ecs}}$. Pour cela on construit un programme dont l'organigramme simplifié est donné ci-dessous.



L'énergie journalière nécessaire pour chauffer l'eau chaude sanitaire s'écrit (en kWh/j)

$$Q_{ecs} = \rho_e c_{pe} V_s (T_s - T_0)/3,6 \cdot 10^6 + K_s V_s (T_s - T_a) 0,024$$

où ρ_e et c_{pe} sont respectivement la masse volumique et la chaleur massique de l'eau à la température moyenne $(T_s + T_0)/2$.

T_a est la température de l'air ambiant et T_0 celle de l'eau du réseau¹

Ainsi pour le 15 du mois d'avril, on a

$$Q_{ecs} = 994 \times 4175 \times 0,2 \times (60 - 11)/3,6 \cdot 10^6 + 10 \times 0,2 \times (60 - 11,4) \times 0,024 = 13,6 \text{ kWh/j}$$

En considérant que T_a et T_0 sont constants sur le mois, on obtient l'énergie mensuelle en multipliant la quantité précédente par le nombre de jour du mois n_{jm} . Dans le cas du mois d'avril, on a $n_{jm}=30$ et par suite $Q_{ecs}=13,6 \times 30=409 \text{ kWh}$.

L'apport solaire journalier Q_s peut être déterminé par l'équation suivante

$$Q_s = e S_c \int_{LS}^{CS} G^* (i, \gamma) \eta dt$$

où e est le facteur d'irradiation que l'on considère constant pour un même mois (cf tableau III.7), S_c la surface de capteurs et η le rendement instantané d'un capteur.

On calcule heure par heure (du lever LS au coucher du soleil CS)

- l'éclairement solaire $G^*(i, \gamma)$
- le rendement du capteur $\eta = 0,79 - 5,81 (T_s - T_a)/G^*$
- on en déduit par intégration numérique l'apport solaire.

Ainsi pour le 15 du mois d'avril, on trouve $\int_{LS}^{CS} G^* (i, \gamma) \eta dt = 2,72 \text{ kWh/m}^2 \cdot j$,

d'où $Q_s = 0,64 \times 6 \times 2,72 = 10,45 \text{ kWh/j}$.

En considérant que la journée du 15 est représentative du mois, on détermine l'apport solaire mensuel en multipliant cette valeur par le nombre de jour du mois

$$Q_s = 10,45 \times 30 = 313 \text{ kWh}.$$

On peut alors en déduire le taux mensuel de couverture solaire pour le mois d'avril

$$TCS = 313/409 = 76,5 \%$$

On recommence ce calcul pour chaque mois de l'année. Le tableau ci-dessous rassemble tous ces résultats.

mois	janv	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
T_a (°C)	4,5	5,4	9,0	11,4	14,8	18,6	20,8	20,7	18,0	13,0	8,3	5,3
T_0 (°C)	7	7	8	11	13	15	16	16	15	13	11	8
Q_{ecs} (kWh)	462	416	448	409	404	371	373	373	372	406	414	454
e	0,47	0,54	0,63	0,64	0,63	0,64	0,67	0,68	0,66	0,60	0,49	0,43
Q_s (kWh)	80	139	264	313	341	350	373	373	342	231	107	61
TCS (%)	17	33	59	77	84	94	100	100	92	57	26	13

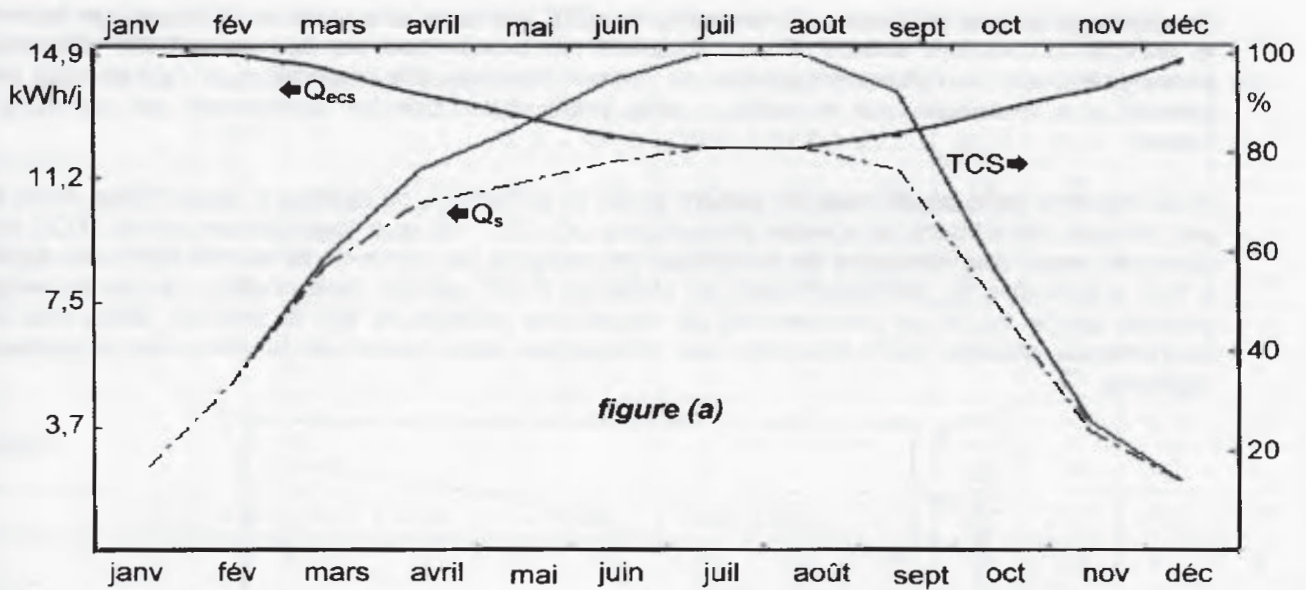
La figure (a) ci-dessous représente l'évolution journalière des résultats précédemment trouvés. On y a reporté les valeurs de Q_{ecs} et Q_s en kWh/j calculées pour le 15 de chaque mois ainsi que la valeur du taux journalier de couverture solaire correspondant. En joignant les différents points on obtient les trois courbes représentées.

On constate que la batterie de capteurs fournit l'intégralité de l'énergie nécessaire au chauffage de l'ECS durant les mois de juillet et août.

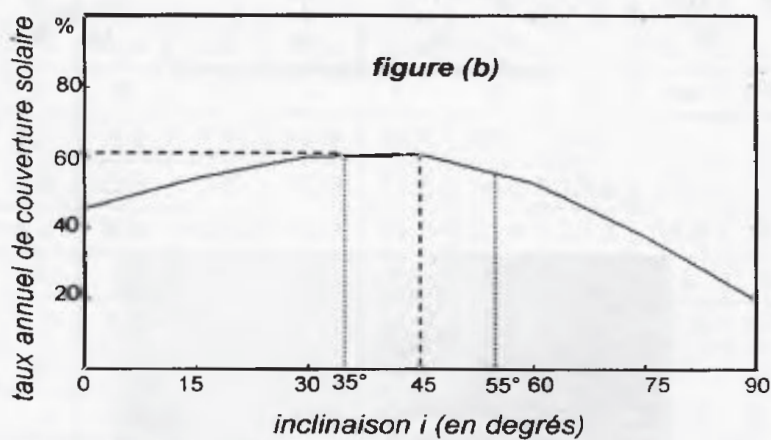
En divisant l'énergie solaire Q_s calculée sur l'année par l'énergie Q_{ecs} annuelle nécessitée par l'ECS, on obtient le taux annuel de couverture solaire. Dans notre exemple celui-ci est égal à

$$TCS \text{ annuel} = \frac{\sum_{\text{année}} Q_s}{\sum_{\text{année}} Q_{ecs}} = \frac{2974}{4902} = 60,7 \%$$

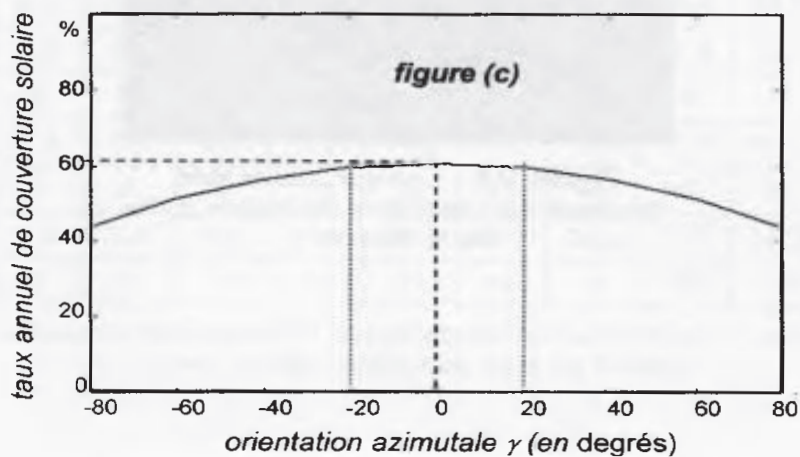
¹ On trouvera au tableau V.1 les valeurs moyennes mensuelles de la température T_a de l'air ambiant et de la température T_0 de l'eau du réseau pour différentes villes de France.



La figure (b) représente le taux annuel de couverture solaire en fonction de l'inclinaison i des capteurs. On constate que l'incidence optimale est proche de la latitude du lieu (ici Toulouse $\varphi=43,6^\circ$). Pour des raisons architecturales, il est parfois difficile de conserver cette valeur de l'inclinaison avec des capteurs situés en toiture. Heureusement on peut remarquer qu'une variation d'une dizaine de degrés de part et d'autre de la latitude du lieu influe assez peu sur le rendement de l'installation.



Une étude similaire a été menée pour montrer l'influence de l'orientation azimutale de la batterie de capteurs [figure (c)].



On constate qu'une différence d'orientation de $\pm 20^\circ$ par rapport au sud ne diminue que faiblement le taux de couverture solaire. Il faut toutefois remarquer que les calculs ont été effectués en considérant une symétrie temporelle de l'ensoleillement. S'il apparaît que l'après-midi est en général plus ensoleillé que le matin, il sera préférable d'orienter légèrement les capteurs vers l'ouest.

Si on reprend cette étude mais en faisant varier la surface S_c de capteurs, toute chose étant égale par ailleurs, on obtient la courbe de la figure (d). On voit que l'accroissement du TCS tend à diminuer avec l'augmentation de la surface de capteurs (la pente de la courbe diminue). Il ne sert à rien d'accroître S_c démesurément; le choix de 6 m^2 semble raisonnable, ce qui correspond, comme on l'a vu, à un taux annuel de couverture solaire de 60 % environ. Mais une étude économique s'avère dans tous les cas nécessaire pour confirmer le choix de la surface de capteurs.

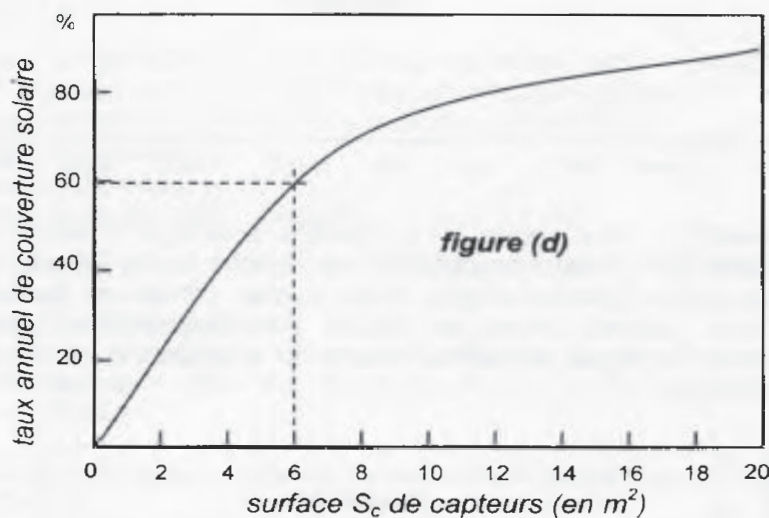


Figure V.6 – Capteur solaire avec stockage sur une toiture de maison à l'île de la Réunion.

VILLE	°C	jan	fév	mars	avril	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
Ajaccio	T _a	7,7	8,7	10,5	12,6	15,9	19,8	22,0	22,2	20,3	16,3	11,8	8,7
	T ₀	10	10	11	14	16	18	19	19	18	16	14	11
Angers	T _a	3,7	4,3	7,4	10,4	13,7	17,0	18,7	18,2	15,6	11,3	7,2	4,4
	T ₀	6,5	6,5	7,5	10,5	12,5	14,5	15,5	15,5	14,5	12,5	10,5	7,5
Besançon	T _a	11	2,2	6,4	9,7	13,6	16,9	18,7	18,3	15,5	10,4	5,7	2,0
	T ₀	5	5	6	9	11	13	14	14	13	11	9	6
Biarritz	T _a	7,6	8,0	10,8	12,0	14,7	17,8	19,7	19,9	18,6	14,8	10,9	8,2
	T ₀	8	8	9	12	14	16	17	17	16	14	12	9
Bordeaux	T _a	5,2	5,9	9,3	11,7	14,7	18,0	19,6	19,5	17,1	12,7	8,4	5,7
	T ₀	7	7	8	11	13	15	16	16	15	13	11	8
Clermont-Ferrand	T _a	2,7	3,5	7,3	10,1	13,7	17,2	19,2	18,8	16,1	11,0	6,7	3,5
	T ₀	6	6	7	10	12	14	15	15	14	12	10	7
Embrun	T _a	0	1,6	5,7	9,0	13,0	16,4	18,9	18,3	15,3	10,1	4,6	0,5
	T ₀	5	5	6	9	11	13	14	14	13	11	9	6
Grenoble	T _a	1,5	3,2	7,7	10,6	14,5	17,8	20,1	19,5	16,7	11,4	6,5	2,3
	T ₀	6	6	7	10	12	14	15	15	14	12	10	7
Lille	T _a	2,4	2,9	6,0	8,9	12,4	15,3	17,1	17,1	14,7	10,4	6,1	3,5
	T ₀	5	5	6	9	11	13	14	14	13	11	9	6
Lyon	T _a	2,1	3,3	7,7	10,9	14,9	18,5	20,7	20,1	16,9	11,4	6,7	3,1
	T ₀	6,5	6,5	7,5	10,5	12,5	14,5	15,5	15,5	14,5	12,5	10,5	7,5
Marseille	T _a	5,5	6,6	10,0	13,0	16,8	20,8	23,3	22,8	19,9	15,0	10,2	6,9
	T ₀	10	10	11	14	16	18	19	19	18	16	14	11
Nice	T _a	7,5	8,5	10,8	13,3	16,7	20,1	22,7	22,5	20,3	16,0	11,5	8,2
	T ₀	10	10	11	14	16	18	19	19	18	16	14	11
Perpignan	T _a	7,5	8,4	11,3	13,9	17,1	21,1	23,8	23,3	20,5	15,9	11,5	8,6
	T ₀	10	10	11	14	16	18	19	19	18	16	14	11
Poitiers	T _a	3,7	4,6	7,9	10,4	13,7	17,2	18,9	18,6	16,1	11,6	7,3	4,5
	T ₀	6,5	6,5	7,5	10,5	12,5	14,5	15,5	15,5	14,5	12,5	10,5	7,5
Rennes	T _a	4,8	5,3	7,9	10,1	13,1	16,2	17,9	17,8	15,7	11,6	7,8	5,4
	T ₀	6	6	7	10	12	14	15	15	14	12	10	7
Strasbourg	T _a	0,4	1,5	5,6	9,8	14,0	17,2	19,0	18,3	15,1	9,5	4,9	1,3
	T ₀	6	6	7	10	12	14	15	15	14	12	10	7
Toulouse	T _a	4,5	5,4	9,0	11,4	14,8	18,6	20,8	20,7	18,0	13,0	8,3	5,3
	T ₀	7	7	8	11	13	15	16	16	15	13	11	8

Tableau V.1 – Moyenne mensuelle des températures de l'air ambiant T_a et de l'eau du réseau T₀ en °C pour différentes villes de France.

3. CHAUFFAGE DES LOCAUX

3.1 Description des systèmes

Si le système de chauffage nécessite des pièces mobiles (ventilateur, pompe, électrovanne...) on parlera de système actif. Un tel système nécessite une énergie autre que solaire; en général celle-ci est électrique vu sa souplesse d'utilisation.

Quand la seule énergie utilisée est celle du soleil, on parle de système passif.

Pour le chauffage d'habitation, le fluide caloporteur est soit l'air, soit l'eau.

L'air est utilisé principalement dans les systèmes passifs. On peut en effet se passer facilement d'énergie auxiliaire pour le mouvoir. L'air est chauffé par les capteurs puis envoyé directement dans les pièces d'habitation. Le stockage de l'énergie se fait alors par léchage d'un matériau solide (mur en béton, lit de pierres,...). Il peut cependant être intéressant de recourir à des ventilateurs pour créer une circulation forcée; les puissances mises en jeu sont toujours faibles, de l'ordre de celles nécessaires au fonctionnement d'une VMC (Ventilation Mécanique Contrôlée).

L'utilisation de l'eau nécessite un échangeur. Son avantage réside dans le volume de stockage nécessaire, beaucoup plus faible qu'avec l'air¹. Dans ce cas on trouvera sur le circuit, une ou plusieurs pompes (circulateurs), des électrovannes, etc.

Dans les paragraphes qui suivent on s'intéresse plus particulièrement aux différents types de stockage

- ballon d'eau
- lit de pierres
- mur porteur

3.2 Stockage par ballon d'eau

Le schéma de principe d'une telle installation est donné à la figure V.7. Les capteurs solaires chauffent l'eau du stockage par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. Cette disposition permet de traiter l'eau qui circule dans les capteurs. Un appoint est souvent nécessaire sous nos latitudes. Quant à l'échangeur stockage-habitation il doit avoir une surface la plus grande possible afin de minimiser l'écart de température entre l'eau à T_{st} provenant du ballon de stockage et l'air à T_i de la maison. Chauffer à basse température améliore le confort. D'autre part le rendement des capteurs est d'autant meilleur que l'écart de température ($T_{fe} - T_a$) entre la température de l'eau à l'entrée des capteurs et celle de l'air extérieur est faible. Or en première approximation $T_{fe} \approx T_{st}$. Il faut donc avoir T_{st} la plus basse possible.

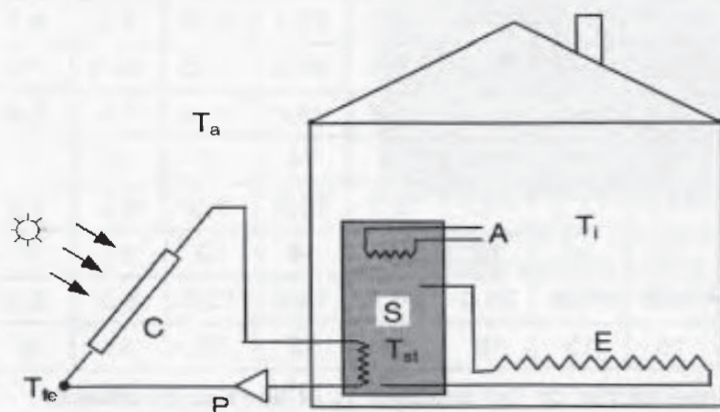


Figure V.7 – Schéma d'une installation de chauffage solaire à eau.

- A appoint
- C capteurs solaires
- E échangeur
- P pompe
- S stockage à T_{st}
- T_a température de l'air extérieur
- T_{fe} température à l'entrée des capteurs
- T_i température de l'air intérieur
- T_{st} température de l'eau du stockage

¹ Les avantages et inconvénients respectifs de l'air et de l'eau comme fluides caloporteurs sont donnés au § IV.1.2.

La gestion de l'énergie doit favoriser le solaire, l'appel à une énergie d'appoint devant être minimisé. Le stockage sert de tampon journalier et permet de fournir la nuit le surplus d'énergie solaire stockée, le cas échéant, durant la journée. Accroître le volume de l'eau du stockage permet de diminuer la température maximale T_{smax} atteinte par l'eau durant une journée très ensoleillée et donc, comme on vient de le voir, d'améliorer le rendement des capteurs. La température T_{st} de l'eau du stockage doit cependant être supérieure ou égale à une température minimale T_{smin} qui permet de transmettre convenablement la chaleur de l'échangeur à l'air de la maison à T_i . Mais augmenter le volume prend de la place et coûte plus cher. Par contre, le diminuer peut entraîner une température de stockage trop grande. Pour conserver un bon rendement des capteurs solaires, cette température ne doit pas dépasser une valeur T_{smax} (70°C par exemple). Dans certaines configurations, on peut être amené à rejeter une partie de l'énergie solaire qui ne peut être stockée.

* Application V.3

Considérons le chauffage d'une maison individuelle et cherchons à déterminer le taux annuel de couverture solaire de l'installation décrite ci-dessous.

- Maison
 - volume $V=210 \text{ m}^3$
 - coefficient de déperdition volumique¹ $B=1 \text{ W/m}^3 \cdot \text{K}$
 - température intérieure constante $T_i=19^\circ\text{C}$
- Géographie
 - lieu d'implantation Toulouse
 - ciel moyennement troublé
 - albédo $a^*=0,3$
 - la température de l'air extérieur T_a et le facteur d'irradiation e sont considérés évoluer linéairement entre deux valeurs lues dans le tableau V.1. Les valeurs de ce tableau sont présumées correspondre au 15 de chaque mois.
- Capteurs solaires
 - surface $S_c = 20 \text{ m}^2$
 - orientation $i=45^\circ$, $\gamma=0^\circ$
 - droite de rendement $\eta = 0,79 - 5,81 (T_{st}-T_a)/G^*$ en faisant l'hypothèse que l'eau en sortie des capteurs est à la température T_{st} du stockage. On en déduit, toutes choses étant égales par ailleurs, que plus la température du stockage sera élevée, moins bon sera le rendement.
- Stockage
 - volume $V_s=2 \text{ m}^3$ isotherme à T_{st}
 - $T_{smin}=25^\circ\text{C}$ température minimale de l'eau
 - $T_{smax}=70^\circ\text{C}$ température maximale de l'eau
 - $MC_p = \text{masse d'eau} \times \text{chaleur massique} = 1000 \times 2 \times 4,185/3600 = 2,325 \text{ kWh/K}$

La gestion de l'énergie est donnée par l'organigramme ci-dessous.

Si $T_i > T_a$, il faut chauffer l'habitation.

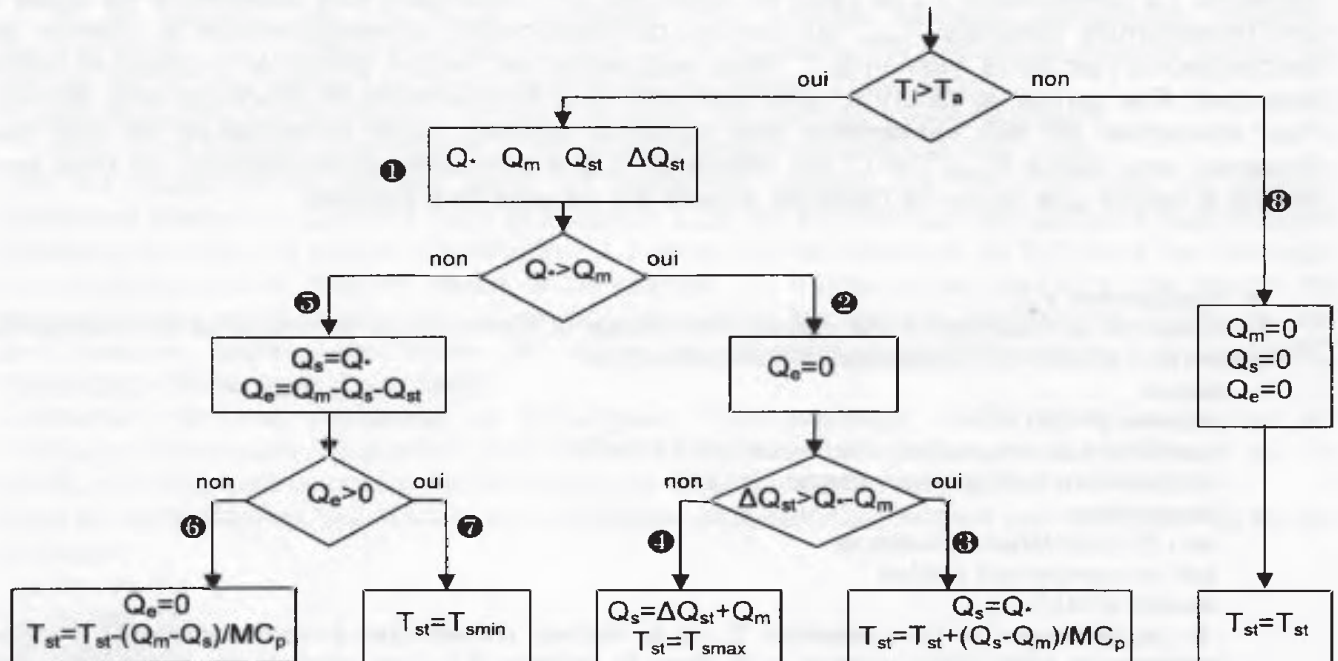
On calcule les grandeurs suivantes

- l'énergie solaire fournie par les capteurs $Q_s = G^* \cdot S_c \cdot e \cdot \eta$,
 - l'énergie nécessaire au chauffage de l'habitation $Q_m = B \cdot V \cdot (T_i - T_a)$,
 - l'énergie du stockage $Q_{st} = MC_p (T_{st} - T_i)$
 - l'énergie complémentaire pouvant être absorbée par l'eau du stockage avant d'atteindre la température limite maximale de consigne T_{smax} fixée à 70°C $\Delta Q_{st} = MC_p \cdot (T_{smax} - T_{st})$ ①
- Si l'énergie solaire Q_s est supérieure à l'énergie de chauffage Q_m ②, le surplus sert à relever la température de l'eau de stockage ③. On se limite cependant à la fraction d'énergie nécessaire pour élever cette température à T_{smax} . Le reste d'énergie solaire est considérée perdue. On note Q_s l'énergie solaire réellement utilisée. On a bien sûr dans ce cas $Q_s < Q_s$ ④.
- Si l'énergie solaire n'est pas suffisante pour les besoins de chauffage ⑤ on utilise en priorité l'énergie stockée dans l'eau ⑥ mais si celle-ci n'est pas suffisante, on fait alors appel à une

¹ Ce coefficient tient compte des apports énergétiques provenant des habitants et de l'ensoleillement par les fenêtres et autres ouvertures.

énergie d'appoint Q_e ⑦ qui va compenser le manque d'énergie pour chauffer l'habitation mais qui ne devra en aucun cas élever la température du stockage.

Si la température extérieure T_a est supérieure à la température de consigne intérieure $T_i=19^\circ\text{C}$, alors il n'y a pas besoin de chauffer l'habitation et la température de l'eau du stockage est conservée⑧.



On cherche à déterminer le taux de couverture solaire TCS pour une journée de ciel clair. Pour cela on calcule, heure par heure¹ l'énergie solaire Q_s (en kWh/h) fournie par la surface $S_c=20\text{ m}^2$ de capteurs plans. On détermine l'énergie Q_m nécessaire pour chauffer l'habitation et on en déduit l'énergie Q_e apportée en appoint (par exemple électrique).

- Sur la figure (a) sont représentées différentes courbes pour la journée du 1^{er} mars. On y trouve

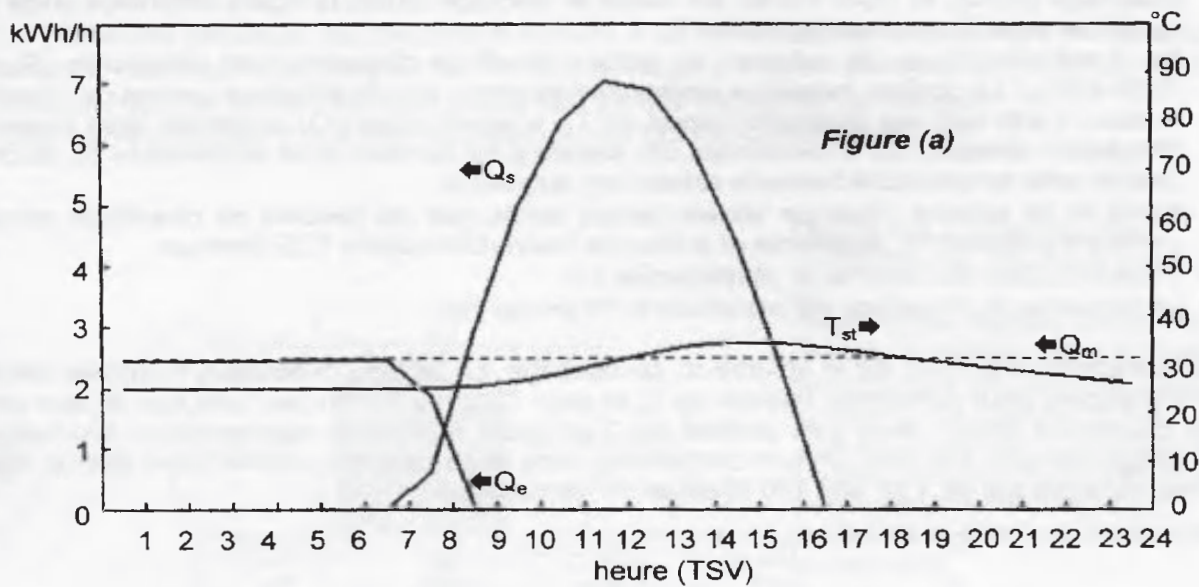
- Q_m (en kWh/h). L'énergie nécessaire au chauffage de l'habitation est constante tout le long de la journée compte tenu des hypothèses. Pour le 1^{er} mars, la température $T_a=(5,4+9,0)/2=7,2^\circ\text{C}$. On en déduit $Q_m=1\times 210\times(19-7,2)=2478\text{ Wh/h}=2,48\text{ kWh/h}$ et par suite l'énergie de chauffage pour cette journée $Q_m=2,48\times 24=59,5\text{ kWh}$.
- Q_s (en kWh/h). L'énergie solaire a l'allure d'une sinusoïde puisque les capteurs sont orientés au sud et que le ciel est clair par hypothèse. L'énergie totale apportée par la batterie de capteurs est déterminée par intégration de Q_s sur la journée considérée; on trouve $Q_s=41,4\text{ kWh}$. Comme $Q_s < Q_m$ on a $Q_s=Q_s$.
- Q_e (en kWh/h). L'énergie du système d'appoint. En début de journée, il n'y a pas d'apport solaire et comme, par hypothèse, $T_{st}=25^\circ\text{C}$, c'est l'appoint qui fournit l'énergie thermique nécessaire au maintien de la température T_i . Dès que le soleil éclaire la batterie de capteurs, cette énergie diminue². En faisant la somme heure par heure de cette énergie sur la journée considérée, on obtient $Q_e=19\text{ kWh}$.
- T_{st} (en $^\circ\text{C}$), température du stockage. On considère $T_{st}=T_{smin}=25^\circ\text{C}$ en début de journée. On peut remarquer l'accroissement de T_{st} lorsque l'énergie solaire Q_s devient supérieure aux besoins de chauffage Q_m . Quand le soleil est couché le stockage fournit de l'énergie au système de chauffage et la température T_{st} diminue.

Remarquons que $Q_s+Q_e=41,4+19=60,4 > Q_m=59,5\text{ kWh}$. La différence correspond à l'accroissement minime de la température du stockage en fin de journée $\Delta T_{st}=(60,4-59,5)/2,325=0,4^\circ\text{C}$.

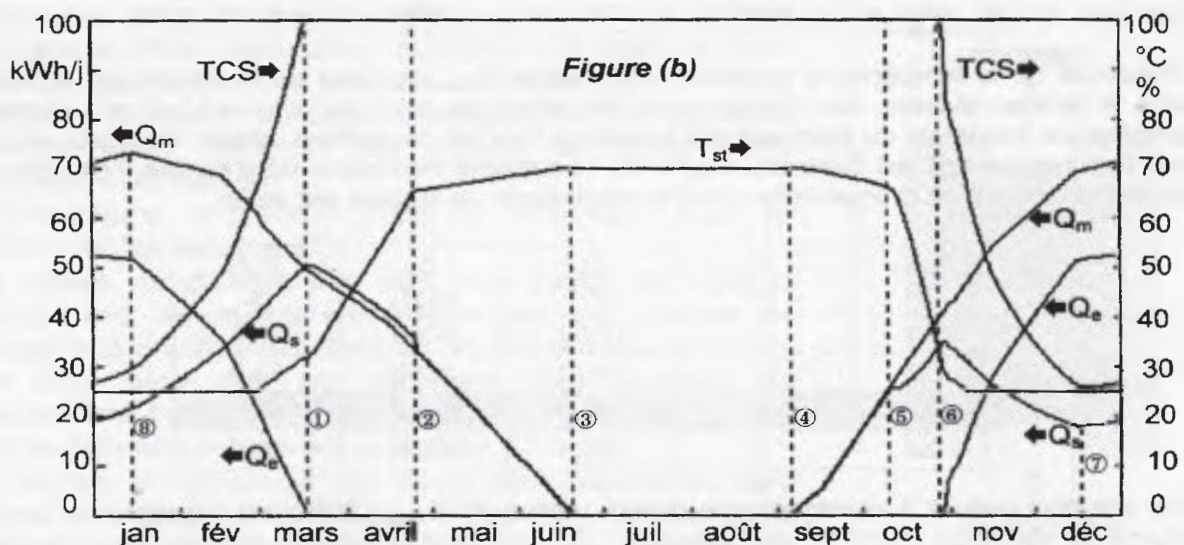
¹ Diminuer le pas de calcul, par exemple $\Delta t=1/4\text{ h}$, n'améliore que très peu les résultats annuels.

² On néglige ici l'inertie thermique des capteurs (cf. paragraphe IV.3).

Le taux de couverture solaire vaut ici $TCS=(Q_m-Q_e)/Q_m=(59,5-19)/59,5=68\%$.



En menant le calcul précédent pour chaque jour de l'année, on obtient les courbes de la figure (b)¹



Les énergies annuelles mises en jeu sont déterminées en faisant la somme de la grandeur considérée (Q_m , Q_s ou Q_e) heure par heure, jour après jour et mois après mois. On peut faire les remarques suivantes

- À compter du 18 mars (①) et ce jusqu'au 9 octobre (⑤), l'apport solaire est supérieur aux besoins de chauffage ($Q_e=0$ et $TCS=100\%$).
- Du 25 avril (②) au 19 juin (③) la température du stockage s'élève pour atteindre la température maximale admissible $T_{smax}=70^\circ\text{C}$. On a en effet Q_s légèrement supérieure à Q_m .
- Du 20 juin (③) au 5 septembre (④) la température extérieure est égale ou supérieure à la température imposée $T_i=19^\circ\text{C}$. Aucun chauffage n'est nécessaire ($Q_m=Q_s=Q_e=0$). La température du stockage est plafonnée à 70°C . La batterie de capteurs est inutilisée.

¹ La flèche qui précède ou suit une grandeur (TCS , Q_m ...) indique l'axe des ordonnées sur lequel on doit lire sa valeur.

- Du 5 septembre (④) au 9 octobre (⑤), l'énergie solaire satisfait presque aux besoins de chauffage ($Q_s \approx Q_m$ et $TCS=100\%$). En réalité le stockage fournit la légère différence entre Q_s et Q_m et par suite T_{st} diminue légèrement.
- Du 9 octobre (⑤) au 28 octobre (⑥), aucun chauffage d'appoint n'est nécessaire ($Q_e=0$ et $TCS=100\%$). La chaleur massique emmagasinée dans l'eau du stockage permet de chauffer la maison. Il s'en suit une diminution rapide de T_{st} . L'apport solaire Q_s augmente alors même que l'irradiation diminue, car le rendement des capteurs est fonction de la température du stockage. Quand cette température baisse le rendement augmente.
- Après le 28 octobre, l'énergie solaire baisse tandis que les besoins de chauffage grimpent. L'énergie d'appoint Q_e augmente et le taux de couverture solaire TCS diminue.
- L'apport solaire est minimal le 18 décembre (⑦).
- La demande de chauffage est maximale le 13 janvier (⑧).

Un paramètre important est le volume V_s du stockage. Le tableau ci-dessous fournit les résultats informatiques pour différentes valeurs de V_s et pour $T_{smax}=70^\circ\text{C}$. On peut voir que le taux annuel de couverture solaire varie peu au-delà de 2 m^3 mais qu'il chute rapidement si le volume du stockage descend trop bas. Un bon compromis, dans notre exemple, semble donc être un volume d'eau du stockage de 2 m^3 soit 100 litres par m^2 de capteurs.

V_s m^3	Q_m kWh	Q_s kWh	Q_e kWh	TCS %
0,2	12401	5584	6817	45,0
1	12401	7280	5121	58,7
2	12401	7439	4962	60,0
6	12401	7617	4784	61,4

L'influence de la température maximale admissible T_{smax} de l'eau du stockage est représentée dans le tableau suivant, les calculs ayant été effectués avec un volume $V_s=2\text{ m}^3$. Diminuer la température maximale du stockage fait baisser le taux de couverture solaire. Ceci provient du fait que, si le rendement des capteurs augmente, la capacité thermique étant limitée, l'énergie solaire stockable diminue et lorsque celle-ci est surabondante, le surplus est perdu.

T_{smax} $^\circ\text{C}$	V_s m^3	Q_s kWh	Q_e kWh	TCS %
30	2	6302	6099	50,8
50	2	7433	4968	59,9
70	2	7439	4962	60,0
90	2	7435	4966	60,0

Une solution revient à combiner une basse valeur de T_{smax} (30°C par exemple) et un grand volume de stockage ($V_s=6\text{ m}^3$ par exemple). On voit dans le tableau des résultats, ci-dessous, que le TCS reste alors aux alentours de 60%.

T_{smax} $^\circ\text{C}$	V_s m^3	Q_s kWh	Q_e kWh	TCS %
30	6	7531	4870	60,7

Si l'on utilise l'eau stockée comme eau chaude sanitaire l'été par exemple, on peut prévoir une régulation saisonnière pour optimiser l'installation $T_{smax}=35^\circ\text{C}$ d'octobre à mai, pour le chauffage, puis $T_{smax}=70^\circ\text{C}$ de juin à septembre, pour l'ECS.

On voit sur cet exemple que les paramètres à prendre en compte sont très nombreux. Dans tous les cas, une étude économique s'avère nécessaire avant de choisir définitivement les caractéristiques d'un système de chauffage solaire.

3.3 Stockage par lit de pierres

Le problème principal du chauffage solaire à air réside dans le stockage de l'énergie en provenance des capteurs mais aussi de la restitution de cette énergie. Le plus souvent c'est une masse importante de matériau solide qui va emmagasiner la chaleur. Le schéma de principe d'une telle installation est donné ci-dessous.

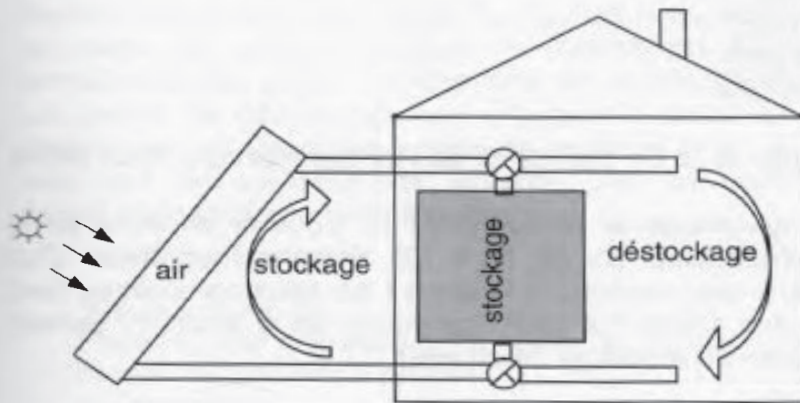


Figure V.8 – Schéma d'une installation de chauffage solaire à air.

Pendant une journée ensoleillée, on chauffe la maison grâce à l'énergie apportée par les capteurs solaires. Si celle-ci est supérieure aux besoins du moment, le surplus est stocké. Durant la nuit l'énergie est déstockée pour maintenir la température intérieure à une valeur acceptable.

Un système utilisé est le stockage par *lit de pierres*. On fait circuler, dans un empilement de galets, de l'air préalablement chauffé dans des capteurs solaires. Il s'en suit une augmentation de la température des pierres et une diminution de celle de l'air qui retourne aux capteurs. Pour réchauffer l'habitation, il suffit de faire circuler l'air de la maison en sens contraire dans le lit de pierres pour récupérer l'énergie emmagasinée. Les surfaces d'échange étant élevées, les écarts de température fluide/galets sont faibles.

Les précautions à prendre dans la réalisation d'un tel système sont les suivantes

- Les galets ne doivent pas être trop petits afin que la perméabilité du milieu n'entraîne pas des pertes de charge trop importantes mais ils ne doivent pas non plus être trop gros afin de minimiser leur gradient de température intérieure. Pour cela on utilise des galets dont le diamètre moyen est de l'ordre de 3 cm.
- Le volume de stockage, qui devra être bien isolé, sera calculé pour que les températures atteintes ne soient pas trop fortes. En général une masse de 300 kg par m² de capteurs convient. La longueur L ne doit pas être trop importante à cause des pertes de charge. Les grandeurs habituelles vont de 1 à 3 m.
- Quant au débit d'air qui circule dans les capteurs, une valeur de 40 m³/h et par m² de capteur est raisonnable. On peut envisager de réduire ce débit lors du déstockage.
- Il faut éviter que l'air chaud envoyé au stockage ne soit trop chargé en humidité. Durant le déstockage, il y a une diminution de la température des galets. Si cette dernière atteint la température du point de rosée de l'air, il y aura condensation de la vapeur d'eau et risque de prolifération de microorganismes préjudiciables à la salubrité de l'air injecté dans la maison.

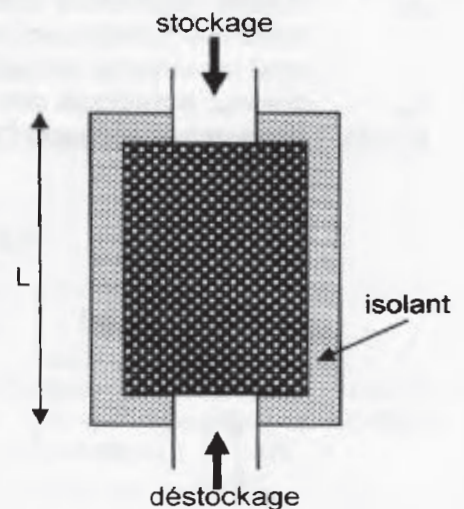


Figure V.9 – Schéma d'un lit de galets avec le sens d'écoulement de l'air en stockage et en déstockage.

Le coefficient d'échange de chaleur entre les galets et l'air peut être caractérisé par un coefficient volumique, noté h_v (en $W/m^3.K$), dont une expression expérimentale a pu être donnée par Lof et Hawley en 1948

$$h_v = 650 \left(\frac{\rho_f \dot{V}}{S D_g} \right)^{0,7}$$

avec ρ_f masse volumique de l'air (kg/m^3)
 \dot{V} débit volumique de l'air (m^3/s)
 S section droite du stockage (m^2)
 D_g diamètre moyen des galets (m)

Pour étudier le champ des températures du lit de pierres et de l'air qui y circule nous allons procéder de la façon suivante.

Considérons un stockage de forme cylindrique et de longueur L . Nous le divisons en N tranches identiques de section S et d'épaisseur Δx (cf. fig.V.10). Faisons l'hypothèse d'un gradient thermique purement axial. Dans une section i à l'instant t les deux paramètres sont la température $T_f(i,t)$ de l'air et $T_s(i,t)$ des galets. Le bilan thermique de la section i permet d'écrire, pour les galets et durant la phase du stockage de chaleur

$$\rho_s S \Delta x c_{ps} \frac{dT_s(i,t)}{dt} = h_v S \Delta x [T_f(i-1,t) - T_s(i,t)] - \dot{Q}_p(i,t)$$

avec

ρ_s masse volumique effective du lit de pierres, égale à la masse volumique réelle du matériau constituant les galets, affectée d'un coefficient de remplissage; celui-ci est égal au volume occupé par les galets sur le volume du lit de pierres ($L \times S$).
 c_{ps} chaleur massique des galets.
 $\dot{Q}_p(i,t)$ chaleur perdue vers l'extérieur à l'instant t par la tranche i du lit de pierres.

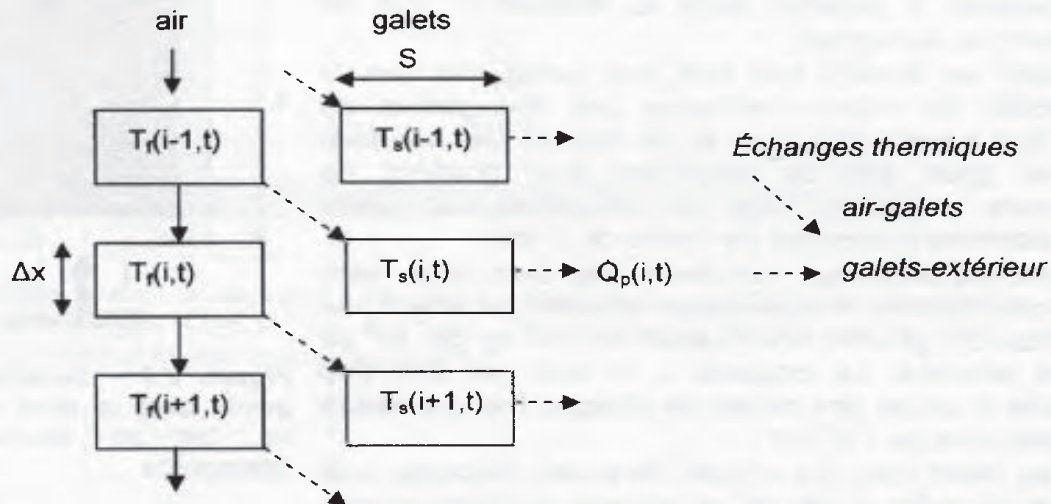


Figure V.10 – Champ des températures à l'instant t de l'air T_f et des galets T_s en fonction de la tranche i . Durant le stockage, l'air de la section $i-1$, à $T_f(i-1,t)$ réchauffe les galets de la section i à $T_s(i,t)$ et se retrouve refroidi à $T_f(i,t)$.

Le bilan thermique du fluide, quant à lui, s'écrit

$$\rho_f \dot{V} \Delta x c_{pf} [T_f(i-1,t) - T_f(i,t)] = h_v S \Delta x [T_f(i-1,t) - T_s(i,t)]$$

avec c_{pf} chaleur massique de l'air

Durant la phase de stockage, l'air qui sort des capteurs à la température T_{fs} entre dans le stockage à cette température puis sort de ce dernier à la température T_{fe} égale à sa température d'entrée dans les capteurs. Ceci suppose que les pertes thermiques en ligne sont négligeables (bonne isolation et faible longueur des conduites d'air).

On arrête le stockage (arrêt du débit d'air) lorsque le rendement des capteurs solaires devient nul, c'est-à-dire quand $T_{fs}=T_{fe}$. On peut alors attendre 1 à 2 heures avant de mettre en route les ventilateurs pour le déstockage. Durant cette période, l'air va prendre la température des galets, compte tenu de sa faible inertie thermique.

La phase de déstockage est similaire à celle de stockage. Le schéma des transferts thermiques est identique à celui de la figure V 10, relatif au stockage, mais en inversant le sens des flèches (sauf bien entendu pour les pertes thermiques avec l'extérieur). On en déduit alors facilement les équations.

* Application V.4

Étudions, pour la journée du 15 février, le cas d'une habitation chauffée par un système solaire à air avec les données suivantes

- Géographie
 - lieu d'implantation Toulouse
 - ciel clair moyennement troublé
 - température de l'air extérieur $T_a=10^\circ\text{C}$
- Maison
 - température intérieure constante $T_i=19^\circ\text{C}$
- Capteurs solaires à air
 - surface $S_c=20\text{ m}^2$
 - orientation $i=45^\circ$, $\gamma=0^\circ$
 - droite de rendement $\eta = 0,7 - 5,4 (T_{fe}-T_a)/G^*$
 - les déperditions thermiques en ligne sont négligées ainsi que l'inertie thermique des capteurs
- Stockage
 - air débit au stockage $0,2\text{ m}^3/\text{s}$, au déstockage $0,15\text{ m}^3/\text{s}$
 - lit de galets $L=2\text{ m}$, $S=2,25\text{ m}^2$ $\rho_s=1350\text{ kg/m}^3$ $c_{ps}=960\text{ J/kg.K}$,
 - volume $V_s=2\text{ m}^3$ isotherme à T_{st}
 - coefficient d'échange thermique avec l'extérieur $h_e=20\text{ W/m}^2.\text{K}$
 - coefficient d'échange thermique air/galets $h_v=1253\text{ W/m}^2.\text{K}$
- La résolution des équations a été menée par la méthode des différences finies avec un pas de temps $\Delta t=1/4$ d'heure et une longueur de tranche $\Delta x=10\text{ cm}$. Les résultats obtenus, relatifs à l'évolution de la température de l'air, sont donnés aux figures ci-dessous.

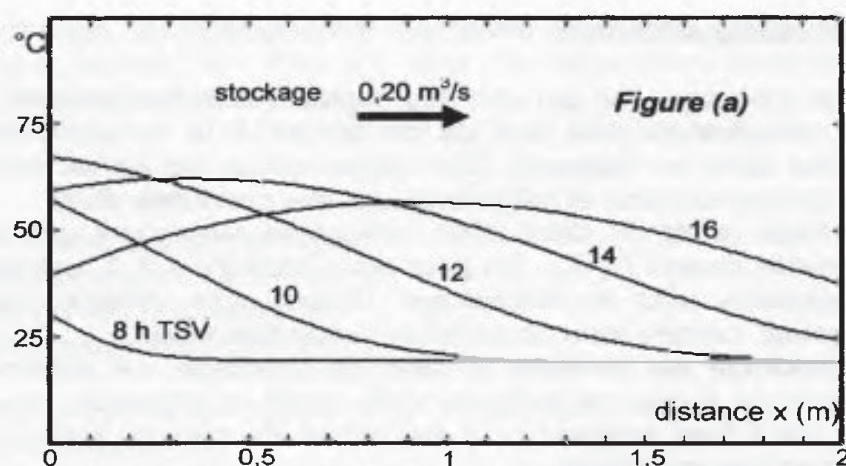
Figure (a)

La section $x=0\text{ m}$ correspond à l'entrée dans le lit de pierres. La température de l'air dans cette section correspond à sa température T_{fs} de sortie des capteurs. La section $x=2\text{ m}$ correspond à la sortie du lit de pierres. La température indiquée est celle de l'air entrant dans les capteurs soit T_{fe} .

Lorsque le soleil se lève, à 6,9 h TSV, on suppose que l'air et le lit de galets sont à la température uniforme $T_i=19^\circ\text{C}$.

Dès que le rendement des capteurs est positif, c'est-à-dire à 7,5 h TSV, un ventilateur fait circuler dans le lit de pierres l'air en provenance des capteurs avec un débit de $0,2\text{ m}^3/\text{s}$. C'est le début du stockage.

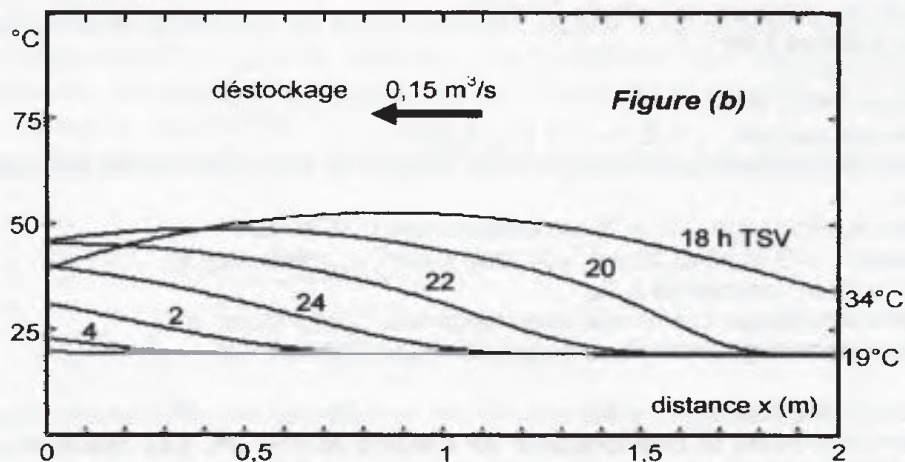
Dès que le rendement s'annule, à 16 h TSV, le ventilateur est arrêté.

**Figure (b)**

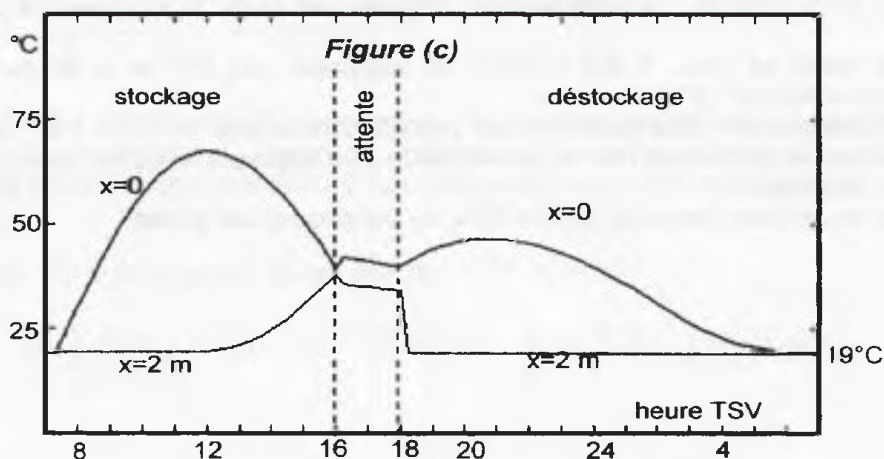
Après une attente de 2 h, durant laquelle se produit une certaine homogénéisation des températures du stockage, on remet le ventilateur en route pour obtenir un débit de déstockage de $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$.

Par hypothèse la température de la maison reste constante à 19°C . L'air à réchauffer entre donc dans le stockage à la cote $x=2 \text{ m}$ à la température de 19°C . La courbe correspondant à 18 h TSV représente la température de l'air confiné dans le stockage; ceci explique la température de 34°C de l'air à la cote $x=2 \text{ m}$.

Cette phase de déstockage s'arrête lorsque la température de sortie de l'air (section $x=0$) égale la température intérieure $T_i=19^\circ\text{C}$.

**Figure (c)**

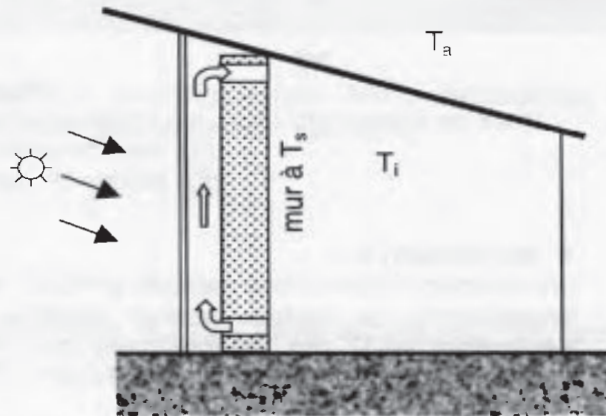
On peut y voir l'évolution de la température $T_f(0,t)$ de l'air à l'entrée du lit de pierres ($x=0$) et celle $T_f(20,t)$ en sortie ($x=2 \text{ m}$). L'indice 20 représente la 20^e tranche du lit de pierres, le pas de calcul étant $\Delta x=10 \text{ cm}$ et la longueur du stockage $L=2 \text{ m}$.



3.4 Stockage par mur capteur

Une autre possibilité de stockage de l'énergie solaire est d'utiliser la structure même de l'habitation, comme par exemple un mur porteur en béton (cf. fig.V 11). Un double vitrage orienté au sud crée un effet de serre. Le mur peint de couleur sombre absorbe le rayonnement solaire. L'intervalle entre le vitrage et le mur joue le rôle d'une cheminée. L'air de la maison y est aspiré; il s'y réchauffe puis retourne dans la maison en partie haute du mur. Le mur s'échauffe durant le jour et restitue la nuit la chaleur emmagasinée. Les pertes nocturnes peuvent être minimisées en déroulant devant la vitre un volet.

Figure V.11 – Schéma simplifié d'un chauffage solaire passif à air utilisant un mur comme surface absorbante et comme stockage thermique (mur capteur).



Ce système peut être analysé grâce à l'analogie électrique. On peut en effet le représenter par le schéma de la figure V 12 avec les données suivantes

- T_s température du mur
- T_i température de l'air intérieur
- T_a température extérieure
- Q^* énergie solaire absorbée par le mur
- $(MC_p)_s$ chaleur massique du mur
- R_{sa} résistance thermique entre le mur et l'extérieur
- R_{ia} résistance thermique entre l'intérieur et l'extérieur
- R_{si} résistance thermique entre le mur et l'intérieur

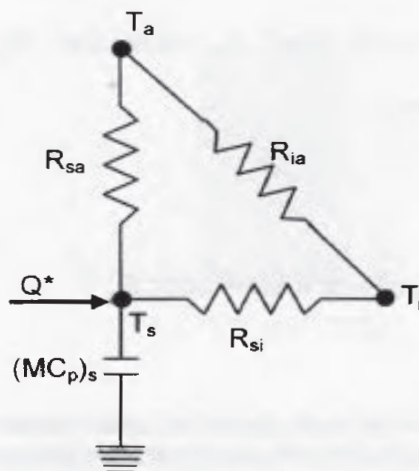


Figure V.12 – Similitude électrique du système de chauffage passif à air de la figure V.11.

Ce principe a été développé par Félix Trombe et Jacques Michel. Plusieurs maisons ont été construites, entre 1967 et 1974, sur le site du CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) à Font-Romeu (Pyrénées Orientales). Ci-dessous sont représentées deux vues de logements utilisant cette technique.



Figure V.13

Vues de logements, dans les Pyrénées-Orientales, utilisant la technique du mur-capteur.

(a) maison solaire du CNRS à Odeillo.

(b) bâtiment communal à La LLagonne

* Application V.5

Une maison, située à une latitude $\varphi=42,5^\circ$ est chauffée par un mur-capteur solaire. Cherchons à dimensionner ce capteur vertical constitué d'un mur en béton ($\rho=2200 \text{ kg/m}^3$, $c_p=880 \text{ J/kg.K}$) d'épaisseur $e=37 \text{ cm}$, orienté plein sud et équipé d'un double vitrage. Il doit permettre de maintenir l'intérieur de la maison à $T_i=20^\circ\text{C}$. Les caractéristiques de la maison sont les suivantes

- volume $V=450 \text{ m}^3$
- coefficient de déperdition volumique $G=1 \text{ W/m}^3.\text{K}$ (on néglige les apports thermiques dus aux habitants et aux appareils ménagers)
- le rendement moyen journalier du mur-capteur $\bar{\eta} = 0,65$

Les calculs sont menés pour la journée du 15 janvier pour laquelle la température extérieure est supposée constante $T_a=5^\circ\text{C}$ et le ciel clair et pur. L'albédo du sol $a^*=0,3$.

Les besoins Q_e pour la journée considérée s'élève à

$$Q_e = G \cdot V (T_i - T_a) \Delta t = 1 \times 450 \times (20 - 5) \times 24 / 1000 = 162 \text{ kWh.}$$

Les apports solaires sont déterminés en utilisant la simplification sinusoïdale de l'éclairement.

Les hypothèses $\Rightarrow a=0$ (midi solaire), $i=90^\circ$ (mur vertical), $\gamma=0$ (plein sud). On en déduit

$$R_s = 1 / \tan h_m$$

$$R_G = \left(\frac{1}{\tan h_m} - \frac{1}{2} \right) \frac{I^* \sin h_m}{G_h^*} + \frac{1 + a^*}{2}$$

avec $h_m = \sin^{-1}[\cos(\delta - \varphi)]$

Dans notre cas, $n=15$, $\delta=-21,3^\circ$, $h_m=26^\circ$, $ddj=9,2 \text{ h}$, $I^*=838 \text{ W/m}^2$, $G_{hm}^*=438 \text{ W/m}^2$, $R_G=1,95$

d'où $G_{vm}^* = R_G \cdot G_{hm}^* = 1,95 \times 438 = 854 \text{ W/m}^2$

L'hypothèse sinusoïdale donne l'irradiation de la journée

$$G_v = 2 \frac{ddj}{\pi} G_{vm}^* = 2 \frac{9,2}{\pi} 854 = 5 \text{ kWh/m}^2$$

Les apports solaires se montent à

$$Q_s = \bar{\eta} G_v = 0,65 \times 5 = 3,25 \text{ kWh/m}^2$$

La surface de capteur nécessaire pour subvenir aux besoins s'élève donc à

$$S_c = \frac{Q_e}{G_s} = \frac{162}{3,25} = 49,85 \text{ m}^2$$

Le mur s'échauffe sous l'action du rayonnement solaire. Il transmet alors cette énergie par conduction puis par convection naturelle à la pièce qu'il délimite. Si l'énergie solaire absorbée est supérieure à l'énergie transmise, il emmagasine le surplus d'énergie qu'il restitue la nuit. Mais sa grande capacité thermique lui évite de monter trop haut en température. Dans cette application, la capacité thermique du mur s'écrit

$$M \cdot c_p = \rho \cdot V \cdot c_p = 2200 \times (46,3 \times 0,37) \times 880 = 33,166 \cdot 10^6 \text{ J/K} = 9,2 \text{ kWh/K.}$$

Notons qu'une partie importante de l'énergie est transmise par l'intermédiaire de l'air qui s'échauffe en léchant le mur et entre en partie haute dans la maison.

4. DÉTERMINATION DES BESOINS EN CHAUFFAGE

Pour dimensionner une installation de chauffage solaire il est nécessaire de connaître avec une bonne approximation les besoins thermiques. Dans le cas d'une habitation, nous allons définir plusieurs grandeurs représentatives des échanges thermiques avec l'extérieur. On notera T_i la température de confort que l'on veut maintenir à l'intérieur de l'habitation et T_a la température de l'environnement extérieur.

4.1 Coefficient GV

Ce coefficient, appelé *coefficient de déperdition thermique* (en W/K), caractérise les déperditions thermiques \dot{Q}_{th} du bâtiment. On le définit par l'équation suivante

$$\dot{Q}_{th} = GV (T_i - T_a).$$

Les pertes thermiques ont plusieurs origines

- les **murs** de surface S_m on définit un coefficient K_m (en W/m².K) tel que les pertes thermiques par les parois opaques s'écrivent

$$\dot{Q}_m = K_m (T_i - T_a) S_m.$$

Dans le cas d'un mur maçonné (épaisseur e_1 et conductivité thermique λ_1) avec isolation intérieure (e_2, λ_2), on a (cf. Annexe D)

$$K_m = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{1}{h_2}}$$

où h_1 et h_2 sont respectivement les coefficients de convection+rayonnement entre le mur extérieur et l'environnement à T_a et entre le mur intérieur et l'air intérieur à T_i .

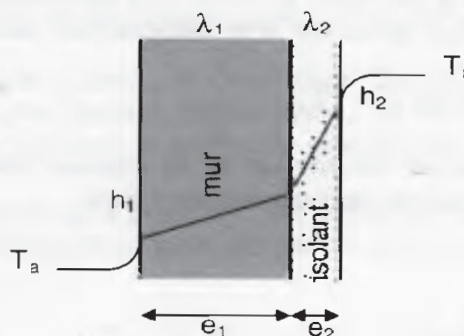


Figure V.14 – Champ des températures dans un mur composé.

- les **vitrages** de surface totale S_v c'est souvent le point faible de l'isolation thermique des bâtiments anciens. Actuellement le double-vitrage s'est généralisé et les déperditions thermiques sont plus faibles. La conductivité K_v se situe aux alentours de 3 W/m².K. En remplaçant entre les deux vitres l'air par de l'argon, dont la conductivité est plus faible, on améliore sensiblement la valeur de K_v (1,5 à 2 W/m².K). La puissance perdue par ces surfaces vitrées s'écrit

$$\dot{Q}_v = K_v (T_i - T_a) S_v.$$

- le **plancher** de surface totale S_p les déperditions ont lieu principalement par conduction à travers le dallage posé à même le sol naturel (hérisson) ou bien avec vide sanitaire. On définit une conductance thermique K_p qui permet d'écrire le flux thermique perdu sous la forme

$$\dot{Q}_p = K_p (T_i - T_a) S_p.$$

- la **toiture** de surface totale S_t en général c'est une couche de laine de verre (épaisseur e , conductivité λ) qui réalise l'isolation. La puissance perdue s'écrit

$$\dot{Q}_t = K_t (T_i - T_a) S_t$$

avec $K_t = \lambda/e$.

- les **ponts thermiques** le plus souvent l'isolation des murs est réalisée à l'intérieur ce qui a pour inconvénient de créer des ponts thermiques au droit des planchers, par exemple (cf. fig.V.15). En première approximation on peut dans un avant-projet chiffrer ces pertes à 10 % de celles des parois (murs+fenêtres+toit+plancher).

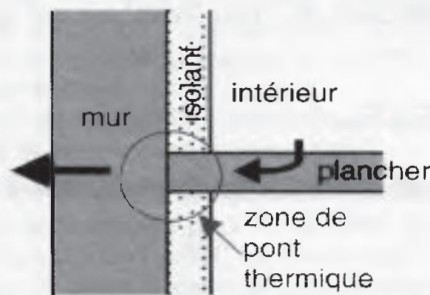


Figure V.15 – Schéma montrant l'existence d'un pont thermique plancher-mur.

- le **renouvellement d'air** plus une maison est isolée, plus elle est étanche à l'air. Il se pose alors un problème de renouvellement de l'air vicié. De plus en plus de constructions font appel à une ventilation mécanique contrôlée (VMC) qui aspire l'air intérieur à T_i et le rejette à l'extérieur. La dépression ainsi réalisée crée un appel d'air neuf qui entre à T_a par les ouïes prévues à cet effet au droit des fenêtres. Mais quand T_a est inférieure à T_i , ce renouvellement d'air entraîne une déperdition calorifique \dot{Q}_a que l'on peut mettre sous la forme

$$\dot{Q}_a = \rho_a \dot{V}_a c_{pa} (T_i - T_a)$$

où ρ_a et c_{pa} sont respectivement la masse volumique et la chaleur massique de l'air tandis que \dot{V}_a représente le débit volumique de renouvellement d'air.

Finalement on peut écrire

$$\dot{Q}_{th} = (\dot{Q}_m + \dot{Q}_v + \dot{Q}_p + \dot{Q}_t) \times 1,1 + \dot{Q}_a = GV (T_i - T_a)$$

ce qui donne

$$GV = (K_m S_m + K_v S_v + K_p S_p + K_t S_t) \times 1,1 + \rho_a \dot{V}_a c_{pa}$$

On parle parfois de *coefficient de déperdition volumique* G (en $W/K.m^3$).

Il suffit de diviser le coefficient GV par le volume V de l'habitation pour obtenir G

$$G = \frac{GV}{V}$$

4.2 Coefficient BV

Le coefficient BV est le *coefficient de besoins thermiques*. Il se déduit du coefficient GV en prenant en compte les apports énergétiques dus aux occupants de l'habitation, aux appareils domestiques et aux apports solaires par les fenêtres. Il s'exprime en W/K.

Soient \dot{Q}_i les apports internes à la maison (en W). On définit une température T_{sc} , dite *température sans chauffage*, correspondant à la température extérieure à partir de laquelle il n'y a plus besoin de chauffage pour maintenir à la température T_i ($T_i > T_{sc}$) l'intérieur de l'habitation, ceci à cause des apports naturels vus plus haut.

On a donc

$$\dot{Q}_i = GV (T_i - T_{sc})$$

et par suite

$$T_{sc} = T_i - \frac{\dot{Q}_i}{GV}$$

Les besoins énergétiques réels \dot{Q}_e sont donnés par l'équation de bilan

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_{th} - \dot{Q}_i$$

mais aussi par définition de BV

$$\dot{Q}_e = BV (T_i - T_a).$$

On en déduit l'égalité suivante

$$BV (T_i - T_a) = GV (T_i - T_a) - GV (T_i - T_{sc})$$

ou encore

$$BV = GV (1 - F)$$

avec

$$F = \frac{T_i - T_{sc}}{T_i - T_a}$$

F est appelé *facteur d'apports gratuits*.

Ce dernier coefficient dépend de nombreux paramètres tels que

- le nombre d'occupants du logement,
- le mode de vie (température de confort, éclairage, appareils électriques, ...),
- la situation géographique (ensoleillement, température extérieure, ...),
- la construction de la maison (orientation par rapport au sud, dimensions, isolation...).

Difficile à calculer *a priori*, le coefficient BV peut être déduit assez facilement *a posteriori* par le relevé, sur une période déterminée, de la consommation réelle \dot{Q}_e d'énergie primaire du logement et en utilisant la méthode des degrés-jours, explicitée ci-dessous.

De la même façon que pour GV, on définit un coefficient B (en W/m³/K), appelé *coefficient de déperdition volumique effectif* donné en divisant GB par le volume V de la maison

$$B = \frac{BV}{V}$$

4.3 Méthode des degrés-jours

Elle permet de calculer les besoins en chauffage d'une habitation.

À un instant donné, la puissance thermique effective nécessaire pour maintenir à T_i l'intérieur de l'habitation s'écrit

$$\dot{Q}_e = GV (T_{sc} - T_a).$$

La détermination de l'énergie à fournir au logement durant une période Δt s'écrit

$$Q_e = \int_{\Delta t} GV (T_{sc} - T_a) dt$$

Appelons *nombre de degrés-jours* la quantité suivante

$$ndj = \int_{\Delta t} (T_{sc} - T_a) dt$$

Le terme dt de l'intégrale correspond au nombre de jours durant lesquels la température de l'air extérieur vaut T_a °C avec, bien sûr, $T_a < T_{sc}$. La définition de ndj implique que T_{sc} et T_a représentent des températures moyennes calculées sur la journée. Le nombre de degrés-jours correspond donc au nombre de jours de chauffage multiplié par l'écart de température ($T_{sc} - T_a$) à vaincre.

En considérant que le facteur GV est constant sur la période étudiée, l'énergie à fournir pour le chauffage s'écrit (en Wj)

$$Q_e = GV \quad ndj$$

Pour obtenir Q_e en kWh , il faut diviser par 10^3 et multiplier par 24 le résultat en Wj , ce qui donne

$$Q_e = 0,024 \quad GV \quad ndj.$$

En relevant chaque jour la température ambiante moyenne T_a en un site donné, on peut calculer le nombre de degrés-jours pour une période donnée. Le tableau ci-dessous, valable pour Toulouse, donne mois par mois et pour l'année le nombre de degrés-jours en fonction de la température T_{sc} fonction de la température intérieure T_i choisie¹. En faisant varier T_{sc} on peut tracer la courbe des degrés-jours (cf. fig. V 16).

		T_{sc}	17	18	19	20	21	22	23
mois	T_a	njm	ndj						
janvier	4,5	31	388	419	450	481	512	543	574
février	5,4	28	325	353	381	409	437	465	493
mars	9	31	248	279	310	341	372	403	434
avril	11,4	30	168	198	228	258	288	318	348
mai	14,8	31	68	99	130	161	192	223	254
juin	18,6	30	0	0	12	42	72	102	132
juillet	20,8	31	0	0	0	0	6	37	68
août	20,7	31	0	0	0	0	9	40	71
septembre	18	30	0	0	30	60	90	120	150
octobre	13	31	124	155	186	217	248	279	310
novembre	8,3	30	261	291	321	351	381	411	441
décembre	5,3	31	363	394	425	456	487	518	549
année		365	1944	2187	2472	2775	3094	3459	3824

Tableau V.2 – Nombre de degrés-jours ndj à Toulouse, pour chaque mois et pour l'année entière. Les températures sans chauffage T_{sc} et extérieure T_a sont en degrés Celsius.

¹ Quand on ne connaît ni les apports thermiques internes Q_i ni le coefficient GV , on peut prendre pour T_{sc} la valeur de T_i diminuée de 1 à 2 degrés.

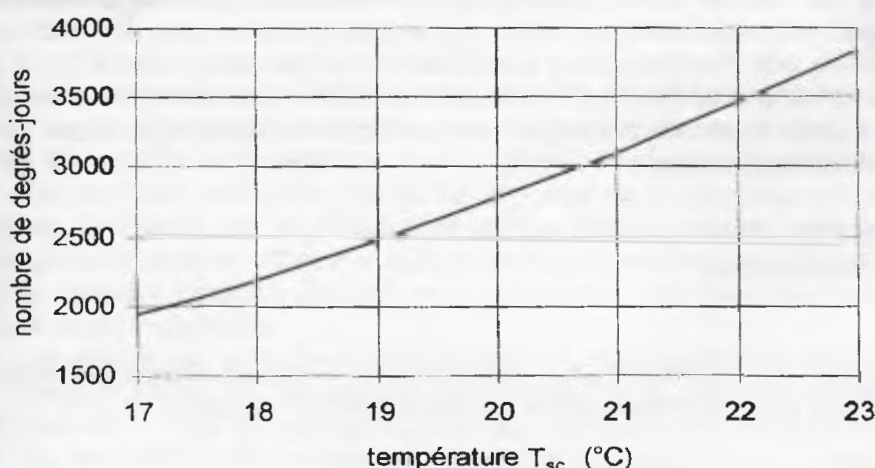


Figure V.16 – Courbe annuelle des degrés-jours pour Toulouse.

* Application V.6

Soit une maison individuelle, située à Toulouse, ayant les caractéristiques données au tableau ci-dessous. Son volume est de 370 m^3 . Les apports internes gratuits se montent à 520 W et sont supposés constants.

source de déperdition thermique	surface S m^2	coefficient d'échange thermique K $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	$K.S$ W/K
murs	132	0,4	52,8
vitres	13	3	39,0
plancher	120	0,4	48,0
toit	130	0,35	45,5
TOTAL			185,3

Pour tenir compte des ponts thermiques, on ajoute au total précédent, 10 % de sa valeur soit $18,5 \text{ W/K}$.

Le débit \dot{V}_a de renouvellement d'air s'élève à la moitié du volume de la maison par heure. Soit $370/2 = 185 \text{ m}^3/\text{h}$ ou encore $185/3600 = 0,0514 \text{ m}^3/\text{s}$ ce qui donne

$$\rho_a c_{pa} \dot{V}_a = 1,225 \times 1002 \times 0,0514 = 63 \text{ W/K}$$

$$\text{On a donc } GV = 185,3 \times 1,1 + 63 = 267 \text{ W/K}$$

$$\text{ce qui donne un coefficient } G = GV/V = 267/370 = 0,72 \text{ W/m}^3 \cdot \text{K}.$$

On veut maintenir une température intérieure $T_i = 20^\circ\text{C}$ durant le mois de janvier. Quels sont les besoins en chauffage durant cette période ?

$$\text{La température limite sans chauffage vaut } T_{sc} = 20 - \frac{520}{267} = 18^\circ\text{C}$$

Pour le mois de janvier, en se reportant au tableau V.2, on lit $ndj = 419$ degrés-jours pour une température $T_{sc} = 18^\circ\text{C}$.

L'énergie de chauffage nécessaire s'élèvera donc, pour ce mois de janvier, à

$$Q_e = 0,024 \times 267 \times 419 = 2\,685 \text{ kWh}.$$

Pour la période annuelle de chauffage, qui s'étend, d'après le tableau, du mois d'octobre au mois de mai (pour $T_{sc} = 18^\circ\text{C}$), on obtient

$$Q_e = 0,024 \times 267 \times 2187 = 14\,014 \text{ kWh}.$$

4.4 Réglementation thermique 2000

Applicable à compter du 1^{er} juin 2001, la nouvelle réglementation thermique 2000 (RT2000) a été formulée par un décret du Code de la Construction et de l'Habitation (n°2000-1153 du 29 novembre 2000).

La principale nouveauté est de définir une consommation effective globale annuelle C d'énergie du bâtiment. Celle-ci est exprimée en kWh d'énergie primaire par m^2 habitable. Dans le cas où l'énergie utilisée est électrique un coefficient multiplicateur valant 2,58 doit être utilisé pour passer de la consommation en kWh électriques à la consommation en kWh d'énergie primaire¹. Pour les autres sources d'énergie, ce coefficient est pris égal à un.

Le calcul de cette consommation tient compte

- du chauffage
- de l'eau chaude sanitaire (ECS)
- du renouvellement de l'air (ventilation)
- de l'éclairage
- de la climatisation.

Les performances énergétiques du bâtiment sont comparées à celles d'un bâtiment de référence, fonction de la situation géographique de la construction (cf. figure V 17).

On doit avoir

$$U < U_{\text{réf}}$$

où U représente le coefficient de déperditions calorifiques en $W/m^2.K$.

En période estivale, et sans climatisation, la température intérieure T_i doit pouvoir être maintenue à une valeur inférieure à une température de référence $T_{i,\text{réf}}$ qui dépend là aussi de la situation géographique du bâtiment (cf. figure V 18).

$$T_i < T_{i,\text{réf.}}$$

La consommation globale (en kWh d'énergie primaire) doit être inférieure à une valeur de référence

$$C < C_{\text{réf.}}$$

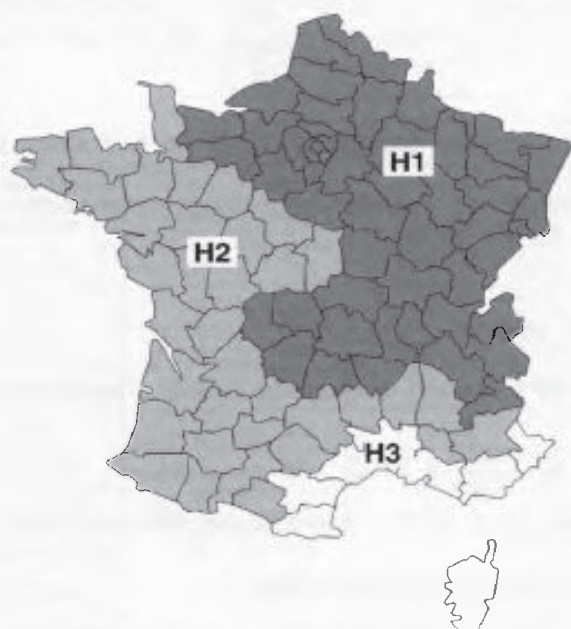


Figure V.17 - Définition des 3 zones servant au choix de l'habitation de référence pour la détermination du coefficient de déperdition calorifique $U_{\text{réf}}$ à ne pas dépasser.

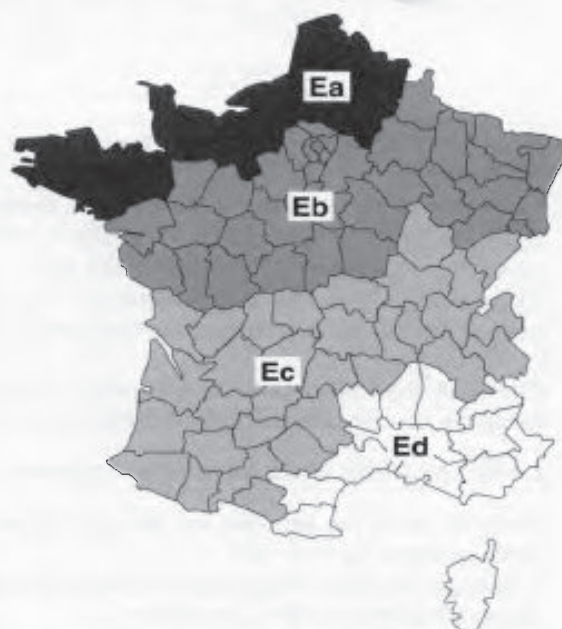


Figure V.18 - Définition des 4 zones servant à la détermination de la température maximale $T_{i,\text{réf}}$ à ne pas dépasser sans climatisation des locaux.

¹ Ceci revient à considérer que la production d'1 kWh électrique équivaut à la consommation de 2,58 kWh d'énergie primaire (gaz, fuel, charbon, bois...).

5. MAISON BIOCLIMATIQUE

Une maison bioclimatique sous-entend une démarche respectueuse de l'environnement lors de sa construction, de son occupation mais aussi de sa déconstruction. On désigne cette démarche architecturale par l'expression *Haute Qualité Environnementale* (HQE).

Nous nous limiterons dans ce qui suit à la période correspondant à l'occupation des locaux. L'objectif de la démarche est de réduire autant que faire se peut la consommation énergétique tout en offrant aux occupants un confort acceptable.

On a souvent opposé confort et écologie; en fait les deux sont compatibles si le projet est mené avec rationalité.

Le climat est le facteur déterminant dans les études dimensionnelles et d'orientation de la maison. Dans ce qui suit on s'intéresse plus particulièrement aux habitations situées en Europe de l'ouest ce qui correspond aux latitudes tempérées de l'hémisphère nord.

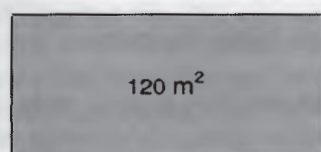
La réalisation d'une maison bioclimatique fait intervenir des techniques très anciennes et d'autres plus récentes. On peut distinguer les *techniques passives* qui consistent à définir l'implantation, la forme du bâtiment, l'isolation et la nature des matériaux de construction, des *techniques dynamiques* qui font appel à une énergie extérieure (le plus souvent électrique) pour faire circuler les fluides.

5.1 Les techniques passives

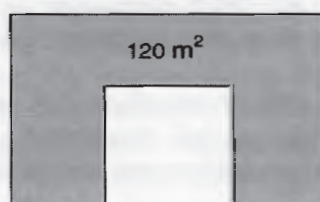
En un site donné (latitude, longitude, altitude, orientation du terrain) il faut recueillir le maximum d'*informations climatiques*

- température de l'air ambiant T_a
- température de l'eau du réseau T_0
- humidité relative ϕ
- pluviométrie hauteurs d'eau mensuelles, écoulement des eaux de pluie
- aérologie force et direction des vents dominants
- ensoleillement éclaircissement G_h et durée d'insolation ddi, ainsi que les facteurs mensuels d'éclaircissement σ et d'irradiation e .

La *forme* du bâtiment est importante car les pertes thermiques sont proportionnelles à l'*enveloppe* du bâtiment. Lorsque l'habitation est entièrement à réaliser on peut réfléchir sur la forme extérieure à donner au bâtiment. Pour un volume intérieur fixé, minimiser les surfaces extérieures revient à dessiner une habitation... sphérique ! La nature avait imaginé cette solution bien avant les architectes; il suffit de regarder les œufs d'oiseaux; leur sphéricité minimise les déperditions calorifiques pour un volume donné. L'igloo hémisphérique des esquimaux se rapproche de la forme idéale. Cette forme sphérique étant difficilement compatible avec le mode de vie habituel tel qu'on le conçoit sous nos latitudes, on peut alors imaginer un habitat cylindrique; c'est la tour du château, le corps du moulin à vent... Mais il n'en reste pas moins difficile de meubler des pièces aux parois courbes. On peut caractériser la *compacité* de la construction par le rapport entre la surface habitable et la surface de l'enveloppe.



bonne compacité



mauvaise compacité

Figure V.19 – Compacité d'une maison en fonction de sa forme, pour une même surface de plancher (120 m^2).

L'*implantation* du bâtiment est fondamentale et doit être choisie en fonction des informations climatiques que l'on possède.

Pour récupérer au mieux l'énergie solaire, lors des périodes froides, il faut placer un maximum de parois vitrées au sud, telles que fenêtres, portes vitrées, bow-windows¹, oriels² (dans le cas d'immeubles)... ce qui a, en plus, l'avantage de fournir un éclairage naturel des pièces à vivre.

Pour minimiser les déperditions par les parois non ensoleillées, on peut envisager d'adosser la façade nord à un talus artificiel ou bien d'utiliser la pente naturelle si le terrain est sur la face sud d'une colline.

Dans tous les cas d'implantation, il faut étudier avec attention les effets de masque éventuels (cf. chapitre III.2) dus à la présence d'autres habitations, d'arbres à feuilles persistantes, ou bien à cause du relief.

L'*isolation* doit être poussée au maximum. L'hiver, les déperditions sont ainsi minimales tandis que l'été la fraîcheur intérieure peut être conservée.

Les menuiseries doivent posséder un double vitrage et être en matériau isolant (bois, PVC) ou bien en aluminium avec rupture des ponts thermiques.

En hiver la mise en place de volets dès que le soleil est couché permet de diminuer les déperditions par les surfaces vitrées.

L'été ces mêmes volets peuvent servir à réduire l'entrée directe du soleil. Toujours pour se protéger de l'ensoleillement direct on peut installer des stores ou bien construire un balcon ou un avant toit, dont les dimensions seront déterminées en utilisant par exemple le diagramme solaire.

On peut aussi planter des arbres à feuilles caduques au sud en hiver les rayons du soleil passent entre les branches nues alors qu'en été ils sont piégés par le feuillage.

Attention à ne pas oublier de réaliser une bonne aération car une maison bien isolée est aussi une maison hermétique qu'il est absolument nécessaire de bien ventiler afin d'éviter des problèmes d'accumulation de l'humidité générée par la respiration humaine (50 g/h environ) et par les appareils de chauffage et de cuisson à flammes.

La construction, au sud, d'une serre ou d'une véranda, favorise la captation de l'énergie solaire en période froide tout en créant un *espace tampon* qui accroît l'isolation effective de l'habitation. En partie nord de celle-ci il est judicieux de renforcer l'isolation thermique et de prévoir d'autres espaces tampons (cellier, garage, débarras...).

Réaliser une isolation extérieure de l'habitation évite les ponts thermiques au droit des planchers. Cette technique est évidemment plus intéressante pour les immeubles à plusieurs étages. L'inconvénient est de présenter aux intempéries des matériaux qui sont souvent fragiles (polyuréthane, polystyrène, laine de roche...) et qui supportent mal les revêtements en ciment (crépi).

Il faut aussi savoir se protéger du *vent*. Celui-ci est une composante non négligeable dans l'étude des déperditions thermiques par convection forcée.

La meilleure des solutions est sans conteste de chercher à diminuer les surfaces soumises au vent en accroissant la compacité du logement.

On peut aussi cacher au vent certaines parties des parois extérieures de la maison. Sous nos latitudes on pourra, par exemple, enterrer la partie nord de la maison. L'éclairage naturel devra alors se faire en toiture.

Toujours pour se protéger du vent, on peut envisager la plantation d'une haie ou d'arbres à feuilles persistantes, la construction d'un mur ou bien l'édification d'une butte de terre.

Une maison bioclimatique sera construite avec des *matériaux* naturels tel que le bois, le chanvre, la brique crue, ... matériaux qui respirent, ce qui permet une régulation de l'humidité du logement sans installation technique coûteuse.

¹ petit espace vitré en saillie sur la façade d'une maison.

² balcons clos par des surfaces vitrées.

Des murs à forte capacité calorifique, par exemple en pierre ou en béton, créent une inertie thermique favorisant un meilleur confort thermique. La chaleur solaire accumulée pendant la journée est restituée durant la nuit.

Certaines des remarques précédentes sont reportées sur la figure ci-dessous.

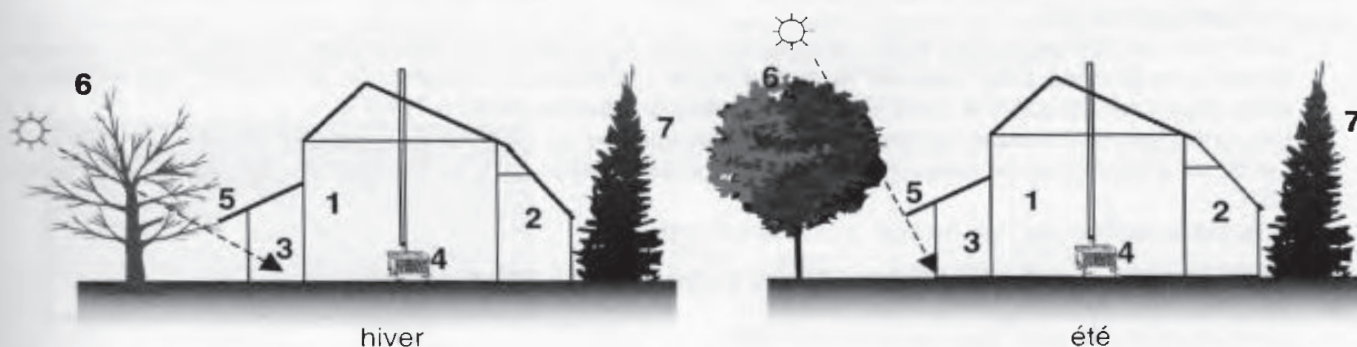


Figure V.20 – Schéma d'une habitation bioclimatique.

1. corps d'habitation, 2. espace tampon au nord avec toiture surbaissée pour réduire la surface de mur, 3. serre au sud, 4. chauffage d'appoint, 5. balcon ou avancée de toiture protégeant du soleil l'été, 6. végétation caduque au sud, 7. végétation persistante au nord.

5.2 Les techniques dynamiques

Il est pratiquement impossible sous nos latitudes de subvenir aux besoins énergétiques d'une maison en utilisant la seule énergie solaire passive. La mise en mouvement des fluides (air et eau) par thermosiphon ou convection naturelle n'est, le plus souvent, pas suffisante pour respecter les débits nécessaires. Les techniques à mettre en place sont alors dites *dynamiques* puisqu'il faut une machine tournante, ventilateur ou pompe, pour faire circuler ces fluides.

En hiver, ces fluides qui sortent de l'enceinte du bâtiment, ont la plupart du temps une température qui est supérieure à la température ambiante extérieure. De la chaleur sensible est évacuée et donc perdue. Il est possible d'en récupérer une partie au moyen d'échangeurs de chaleur.

Considérons le cas du renouvellement de l'air. Celui-ci est absolument nécessaire pour une bonne hygiène de vie (teneur en CO_2 , hygrométrie, odeurs). L'air vicié évacué se trouve à la température T_i de la maison. En hiver cet air est plus chaud que l'air frais à T_a qui vient le remplacer; il y a perte de calories. Pour un débit \dot{V}_a d'air échangé, la puissance perdue \dot{Q}_{air} s'écrit

$$\dot{Q}_{\text{air}} = \rho_a \dot{V}_a c_{pa} (T_i - T_a)$$

où ρ_a représente la masse volumique de l'air et c_{pa} sa chaleur massique.

Une ventilation mécanique contrôlée (VMC) permet d'optimiser le débit d'air évacué. Si de plus celle-ci comporte un échangeur de chaleur entre l'air sortant et l'air entrant, on réalise une économie d'énergie non négligeable c'est la VMC double flux. Le seul souci de ce type d'installation est le risque de condensation au niveau de l'échangeur; en effet l'air chaud est chargé en humidité et si sa température, en baissant au contact de l'air frais, atteint celle du point de rosée, il y a condensation d'une partie de la vapeur d'eau; il faut alors évacuer cette eau pour éviter les phénomènes de corrosion et de prolifération de microorganismes.

Une autre source de fuites thermiques est constituée par les eaux ménagères. Celles-ci, contrairement à l'air, n'ayant pas un débit continu, on peut concevoir la récupération des calories par un échangeur eaux ménagères/eau du réseau, situé dans un ballon de préchauffage.

* Application V.7

Déterminons l'énergie (en kWh) échangée avec l'extérieur par les fluides sortant d'une maison durant une journée pour laquelle la température intérieure est maintenue à $T_i=20^\circ\text{C}$, l'air extérieur étant supposé constant à $T_a=5^\circ\text{C}$ et l'eau froide du réseau étant à $T_0=8^\circ\text{C}$.

La ventilation mécanique simple flux extrait en continu un débit d'air $\dot{V}_a=200 \text{ m}^3/\text{h}$.

Le débit d'eau chaude évacué durant la journée s'élève à $V_e=150$ litres à une température de 35°C .

Énergie évacuée par l'air durant la journée ($\Delta t=24 \text{ h}$)

$$Q_{\text{air}} = \rho_a \dot{V}_a c_{pa} (T_i - T_a) \Delta t = 1,226 \times \frac{200}{3600} \times 1 \times (20 - 5) \times 24 = 24,5 \text{ kWh.}$$

Énergie évacuée par l'eau durant la journée

$$Q_{\text{eau}} = \rho_e V_e c_{pe} (T_e - T_0) = 1000 \times 0,15 \times 4,185 \times (35 - 8) = 16949 \text{ kJ} = \frac{16949}{3,6 \cdot 10^3} = 4,7 \text{ kWh.}$$

Soit, au total

$$Q = Q_{\text{air}} + Q_{\text{eau}} = 24,5 + 4,7 = 29,2 \text{ kWh.}$$

L'importance des pertes thermiques par renouvellement d'air montre tout l'intérêt d'une ventilation mécanique double flux.



Figure V.21

Maison Cornac (près de Toulouse).

Architecte Jean-Pierre Cordier.

Une serre recouvre la façade sud. En hiver l'air chauffé par celle-ci est envoyé dans un stockage en béton qui restitue la chaleur durant la nuit. Des capteurs solaires plans fournissent l'ECS. Un foyer au bois, situé au centre de l'habitation, permet de réduire au minimum les besoins en énergie d'appoint (électricité).

6. Piscine solaire

6.1 Principe

La différence d'une piscine solaire par rapport à une piscine traditionnelle est son mode de chauffage. Celui-ci peut être tout solaire ou bien mixte. Dans ce dernier cas, une énergie d'appoint vient compenser l'insuffisance éventuelle des apports solaires.

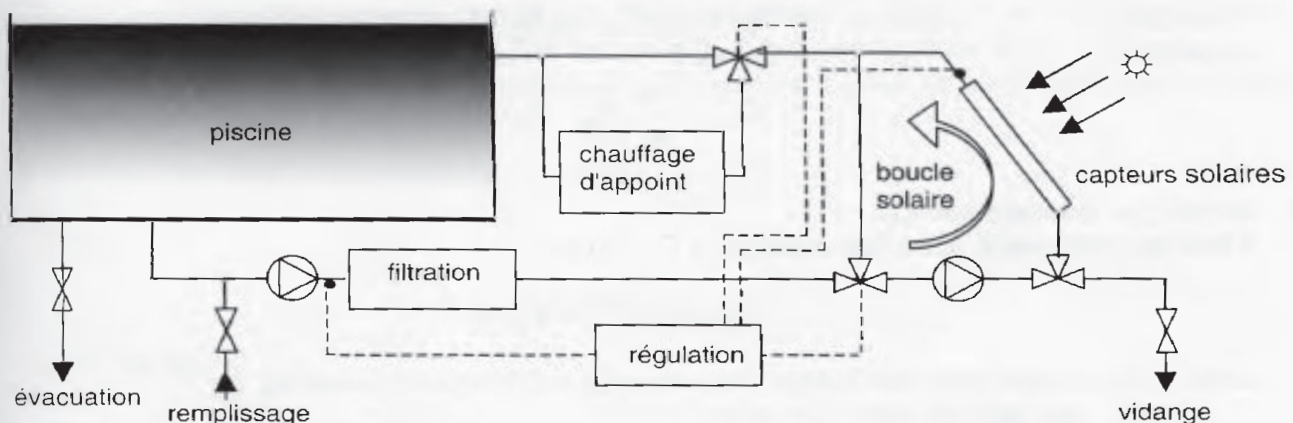


Figure V.22 – Schéma d'une piscine solaire. Au circuit classique de filtration est ajouté une boucle de chauffage solaire.

La température de l'eau de la piscine est un paramètre fondamental à la fois pour l'énergétique solaire mais aussi pour le maintien de la qualité de l'eau. Il va de soi que lorsque la température de l'eau augmente, il en va de même des pertes thermiques.

Le maintien de la qualité de l'eau est généralement réalisé par une filtration et un traitement chimique (régulation du pH et désinfection au chlore). La durée de ce traitement augmente avec la température de l'eau du bassin suivant l'équation simple

$$\text{durée de filtration (en h)} = \text{température de l'eau (en } ^\circ\text{C)} / 2$$

6.2 Analyse énergétique

L'installation solaire doit permettre d'avoir l'eau de la piscine à une température agréable durant les mois de juin à septembre. Les pertes thermiques proviennent des échanges thermiques de l'eau avec les parois du bassin et avec l'air à la surface de celui-ci. Ces pertes devront être compensées par les apports solaires. Ceux-ci sont de deux types : directs par la surface même du bassin qui joue le rôle de capteur plan horizontal et bien sûr indirects, en provenance de la batterie de capteurs que l'on doit dimensionner.

Les pertes thermiques ont cinq origines développées ci-dessous.

1. pertes par conduction \dot{Q}_{cd}

L'eau se refroidit par conduction à travers les parois de la piscine. L'énergie perdue est fonction de la conductivité du matériau constituant ces parois. En général le fond est en béton de 10 cm d'épaisseur ($\lambda=1,75 \text{ W/m.K}$). Quant aux parois leur nature est très variable : on trouve du béton, des aggllos, des palplanches en aluminium, acier ou matériau composite. Dans la plupart des cas l'étanchéité est réalisée par la pose d'un

liner, poche plastique de 75/100^e de mm. Le ΔT à prendre en compte pour le calcul de \dot{Q}_{cd} est donné par l'écart de température entre l'eau de la piscine à T_e et le sol. On peut prendre, pour la température du sol, la température T_0 de l'eau du réseau d'adduction d'eau (cf. tableau V 1). En considérant que les parois, de surface totale S_p , sont toutes de même nature avec une conductivité λ_p et une épaisseur e_p , on peut écrire le coefficient d'échange thermique par conduction sous la forme

$$h_{cd} = \frac{\lambda_p}{e_p}$$

On a donc
ou encore

$$\dot{Q}_{cd} = h_{cd} (T_e - T_0) S_p$$

$$\dot{Q}_{cd} = \frac{\lambda_p}{e_p} (T_e - T_0) S_p$$

2. pertes par convection \dot{Q}_{cv}

Elles se produisent avec l'air ambiant à T_a . On a

$$\dot{Q}_{cv} = h_{cv} (T_e - T_a) S_e$$

avec h_{cv} coefficient d'échange thermique par convection ($W/m^2.K$)
 S_e surface de l'eau du bassin (m^2)

Si un vent souffle sur la surface de la piscine un refroidissement se produira comme lorsque l'on souffle sur un bol de soupe pour la refroidir. La détermination de cette composante s'avère délicate d'autant qu'elle est liée au phénomène d'évaporation traité plus loin. Une approximation permettant d'en avoir une idée lors d'un avant-projet est de considérer la formule simple suivante (cf. Annexe D) qui donne le coefficient de convection forcée h_{cv} (en $W/m^2.K$)

$$h_{cv} = 5,7 + 3,8 w$$

où w est la composante du vent parallèle au capteur (en m/s).

3. pertes par rayonnement \dot{Q}_r

La surface de l'eau rayonne avec le ciel que l'on peut considérer (par ciel clair) comme un corps noir à la température

$$T_\infty = 0,0522 T_a^{1,5}$$

où T_a est la température de l'air ambiant (avec T_∞ et T_a en K). Par ciel couvert on peut considérer $T_\infty = 288$ K. On rappelle que les durées ciel clair-ciel couvert sont dans le rapport σ appelé facteur d'éclairement (cf. tableau III.7).

On peut écrire

$$\dot{Q}_r = \varepsilon \sigma (T_e^4 - T_\infty^4) S_e$$

avec ε émissivité infrarouge de l'eau
 σ constante de Stefan-Boltzman¹ ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2.K^4$)
 T_∞ température du ciel (K)

4. pertes par évaporation \dot{Q}_{ev}

Elles sont proportionnelles au coefficient d'échange thermique par convection h_{cv} et à l'humidité relative de l'air balayant l'eau de la piscine. De l'air sec mû par un vent fort se chargera en humidité et par suite refroidira de façon importante l'eau de la piscine. Soient φ_1 et φ_2 les humidités relatives de l'air avant et après le passage de celui-ci au-dessus de l'eau de la piscine. Une formule empirique donne la puissance échangée par évaporation

¹ Ne pas confondre avec le facteur d'éclairement σ .

$$\dot{Q}_{ev} = \frac{h_{cv} L_v}{c_{pa}} (\phi_2 \omega_{se} - \phi_1 \omega_{sa})$$

- avec h_{cv} coefficient d'échange thermique par convection entre l'eau et l'air ($W/m^2.K$)
 L_v chaleur latente d'évaporation de l'eau = 2450 kJ/kg
 c_{pa} chaleur massique de l'air = 1 kJ/kg d'air.K
 ϕ_2 humidité relative de l'air après son passage au-dessus de l'eau de la piscine
 ω_{se} humidité absolue de l'air saturé à T_e (kg d'eau/kg d'air sec)
 ϕ_1 humidité relative de l'air avant son passage au-dessus de l'eau de la piscine
 ω_{sa} humidité absolue de l'air saturé à T_a (kg d'eau/kg d'air sec)

L'humidité absolue ω_s de l'air saturé à la température T peut être calculée par la relation suivante

$$\omega_s = 0,622 \frac{p_{vs}}{1,013.10^5 - p_{vs}}$$

avec

$$p_{vs} = 611 \exp\left(\frac{T}{0,059 T + 13,706}\right)$$

où T est en $^{\circ}C$.

5. pertes par renouvellement d'eau \dot{Q}_e

Le niveau de l'eau du bassin a tendance à diminuer à cause du phénomène d'évaporation vu précédemment mais aussi à cause de l'eau emportée et projetée à l'extérieur du bassin par les baigneurs. Le nettoyage du filtre entraîne en général la perte d'un certain volume d'eau de la piscine. Dans le cas des bassins publics, il existe des normes de renouvellement imposées par la réglementation. Le maintien du niveau de l'eau de la piscine se fait alors par un apport d'eau du réseau dont la température T_0 est en général plus faible que celle du bassin. On a donc

$$\dot{Q}_e = \frac{k V_e}{\Delta t} \rho_e c_{pe} (T_e - T_0)$$

- avec k fraction du volume V_e de la piscine, renouvelé durant la période Δt
 ρ_e masse volumique de l'eau à T_e (kg/m^3)
 c_{pe} chaleur massique de l'eau à T_e ($J/kg.K$)

Les apports solaires sont de deux types

6. apports solaires directs \dot{Q}_p

On a affaire à un capteur plan horizontal qui absorbe la puissance solaire suivante

$$\dot{Q}_p = \alpha^* G_h^* S_e$$

- avec α^* absorptivité solaire de l'eau
 G_h^* éclairement solaire global reçu sur un plan horizontal (W/m^2)

7. apports solaires dus aux capteurs \dot{Q}_c

Connaissant le rendement η_c des capteurs on peut écrire

$$\dot{Q}_c = \eta_c G^*(i, \gamma) S_c$$

- avec η_c rendement d'un capteur solaire

$G^*(i,\gamma)$ éclairement solaire global reçu par la batterie de capteurs, inclinés d'un angle i par rapport à l'horizontale et orientés suivant la direction γ (W/m^2)
 S_c surface de la batterie de capteurs (m^2)

Si les apports solaires instantanés sont égaux aux pertes instantanées, on peut écrire

$$\dot{Q}_p + \dot{Q}_c = \dot{Q}_{cd} + \dot{Q}_{cv} + \dot{Q}_r + \dot{Q}_{ev} + \dot{Q}_e.$$

En réalité il y aura toujours un déphasage entre les apports et les pertes thermiques. Mais dans le cas d'une piscine, le volume à chauffer ou à maintenir en température est suffisamment important pour que les variations de la température T_e de l'eau de la piscine soient lentes. On peut donc travailler avec une base de temps relativement longue. Si on ne s'intéresse pas aux variations horaires de T_e , on pourra utiliser la journée comme pas de calcul.



Figure V.23 – Vue de la surface de "moquette solaire" (Giordano) utilisée pour le chauffage de la piscine municipale de Puylaurens (Tarn).

* Application V.8

Étudions le bilan thermique d'une piscine solaire, mois par mois, de juin à septembre, avec les données suivantes

- Géographie
 - lieu d'implantation Toulouse
 - ciel clair moyennement troublé
 - les températures de l'air extérieur T_a et de l'eau du réseau T_0 sont considérées constantes sur le mois.
 - composante du vent parallèle aux capteurs et à la piscine $w=3$ m/s
 - humidité relative de l'air $\phi_1=50\%$, $\phi_2=70\%$
- Piscine
 - parois en béton ($\lambda_b=1.73$ W/m.K, $e_b=10$ cm) avec feutre et liner ($\lambda_l=0.04$ W/m.K, $e_l=2$ mm)
 - surface du bassin $S_e=62$ m²
 - volume $V_e=80$ m³
 - surface des parois $S_p=108$ m²
 - température de l'eau supposée constante $T_e=24^\circ\text{C}$
 - coefficients radiatifs de l'eau $\alpha^*=\epsilon=0.9$
 - renouvellement d'eau $k V_e/\Delta t = 150$ litres par jour
 - une bâche à bulles est posée sur l'eau entre 18 h TSV et 8 h TSV. Elle minimise les déperditions par convection, évaporation et rayonnement. On supposera que ces trois grandeurs sont nulles durant les 14 h où la bâche est installée.
- Capteurs de type moquette solaire
 - surface S_c à définir pour subvenir aux besoins
 - installation horizontale
 - droite de rendement $\eta_c = 0.85 - 25 \frac{T_e - T_a}{G^*}$

Calcul des pertes thermiques

1. par **conduction** (en kWh/mois)

$$Q_{cd} = \frac{(T_e - T_0)}{\frac{e_b}{\lambda_b} + \frac{e_l}{\lambda_l}} S_p \frac{24}{1000} njm = \frac{(24 - T_0)}{0,1078} 108 \frac{24}{1000} njm = 24,045 (24 - T_0) njm$$

où njm représente le nombre de jours du mois considéré.

2. par **convection** (en kWh/mois)

$$Q_{cv} = (5,7 + 3,8 w) (T_e - T_a) S_e \frac{24 - 14}{1000} njm = 10,602 (24 - T_a) njm$$

3. par **rayonnement** (en kWh/mois)

$$Q_r = 0,9 \times 5,67 \cdot 10^{-8} \left[(273 + 24)^4 - T_\infty^4 \right] S_e \frac{10}{1000} njm$$

Comme T_∞ est fonction de la nébulosité, il faut considérer les périodes de ciel clair (données par le facteur d'éclairement σ) et celles de ciel couvert ($1-\sigma$) pour lesquelles le ciel est supposé rayonner à la température de 288 K, d'où

$$Q_r = 3,164 \cdot 10^{-8} \left[\sigma \left(297^4 - (0,0522(T_a + 273)^{1,5})^4 \right) + (1 - \sigma)(297^4 - 288^4) \right] njm$$

4. par **évaporation** (en kWh/mois)

$$Q_{ev} = \frac{(5,7 + 3,8 w) 2450}{1} (\varphi_2 \omega_{se} - \varphi_1 \omega_{sa}) S_e \frac{10}{1000} njm$$

avec $\omega_{se} = 0,01915$ kg d'eau/kg d'air sec et ω_{sa} fonction de T_a .

$$Q_{ev} = 2,5975 \cdot 10^4 (0,0134 - 0,5 \omega_{sa}) njm$$

5. par **renouvellement d'eau** (en kWh/mois)

$$Q_e = 0,150 \times 1000 \times 4180 (24 - T_0) njm / (3,6 \cdot 10^6) = 0,1742 (24 - T_0) njm$$

Calcul des apports solaires

6. **apports solaires directs** (en kWh/mois)

On commence par calculer G_{hm}^* l'éclairement solaire global reçu par un plan horizontal à midi solaire le 15 du mois considéré. Ce calcul est effectué selon la démarche expliquée au chapitre III (paragraphe 4). On en déduit l'énergie reçue par le plan d'eau pour cette journée,

en utilisant l'approximation sinusoïdale $G_{0h} = 2 \frac{ddj}{\pi} G_{hm}^* S_e$

En considérant que la journée du 15 est représentative du mois, on multiplie G_{0h} par le nombre de jours du mois njm et, pour tenir compte de la nébulosité, on multiplie ce résultat par le facteur d'irradiation e (cf. tableau III.7), ce qui donne G_h .

On obtient Q_p en multipliant G_h par l'absorptivité solaire $\alpha^* = 0,9$ de l'eau.

$$Q_p = 2 \frac{ddj}{\pi} G_{hm}^* S_e njm e \alpha^* \frac{1}{1000}$$

7. **apports solaires dus aux capteurs** (en kWh/m².mois)

$$Q_c = \int_{LS}^{CS} \eta_c G_h^* S_c dt = \int_{LS}^{CS} \left(0,85 - 25 \frac{(T_e - T_a)}{G_h^*} \right) G_h^* dt \text{ pour une journée.}$$

En faisant les mêmes hypothèses que pour l'apport solaire direct, à savoir que la journée du 15 est représentative du mois et que l'éclairement journalier a une allure sinusoïdale, on obtient l'apport solaire mensuel des capteurs par l'équation suivante

$$Q_c = \left[0,541 G_{hm}^* - 25 (24 - T_a) \right] \frac{ddj \cdot e}{1000} njm$$

Pour obtenir la surface S_c de capteurs qui permet de compenser les pertes, on résout la relation suivante

$$S_c = \frac{Q_{cd} + Q_{cv} + Q_r + Q_{ev} + Q_e - Q_p}{Q_c}$$

Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

mois	unités	mai	juin	juillet	août	septembre
njm	j	31	30	31	31	30
T_a	°C	14,8	18,6	20,8	20,7	18,0
T_o	°C	13	15	16	16	15
σ		0,50	0,52	0,56	0,57	0,54
e		0,63	0,64	0,67	0,68	0,66
ddj	h	14,5	15,2	14,9	13,8	12,3
G_{hm}^*	W/m ²	960	999	984	908	755
Q_{cd}	kWh/mois	8199	6492	5963	5963	6492
Q_{cv}	kWh/mois	3024	1718	1052	1085	1908
Q_r	kWh/mois	2189	1998	2040	2066	2071
Q_{ev}	kWh/mois	6533	5157	4498	4538	5359
Q_e	kWh/mois	59	47	43	43	47
Q_p	kWh/mois	9657	10357	10818	9383	6532
Q_c	kWh/m ² .mois	82	118	140	119	63
S_c	m ²	126	43	20	36	148

On constate que pour compenser les pertes thermiques durant les mois de mai et septembre, la surface nécessaire de capteurs solaires devient prohibitive (148 m² !). Pour ces deux mois on peut faire appel à une énergie d'appoint ou bien ... se contenter d'une température plus basse. Le choix de la surface de capteurs doit être fait après une analyse économique, car une surface surdimensionnée travaillera partiellement les mois de fort ensoleillement, ce qui n'est pas très rentable. Il est courant, sous nos latitudes, de prévoir une surface de capteurs équivalente à celle du bassin, soit dans notre cas une surface d'environ 60 m².

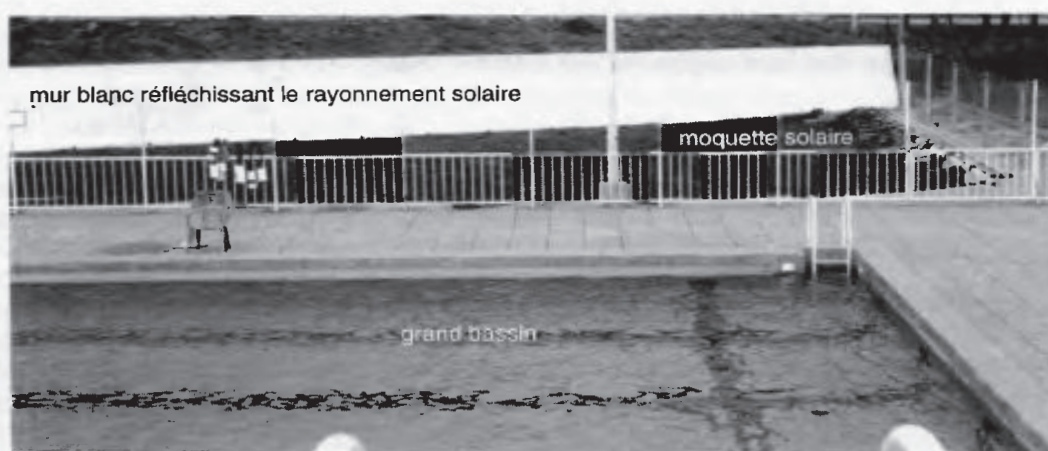


Figure V.24 – Vue générale de la piscine solaire de Puylaurens (Tarn).

7. SÉCHAGE SOLAIRE

Pour conserver le fourrage en vue de sa consommation hivernale par des ruminants, par exemple, il est nécessaire de bien le sécher après la coupe. Ce séchage peut avoir lieu *en grange* ce qui permet de se prémunir des aléas climatiques. Pour ce faire, on souffle de l'air sur le produit qui va ainsi perdre de son humidité. Cette ventilation prend un certain temps que l'on peut réduire par un préchauffage de l'air pulsé. Ce préchauffage de l'air peut se faire grâce à des résistances électriques, ou bien par combustion d'hydrocarbures dans une chaudière ou encore en utilisant l'énergie solaire, ce qui est somme toute beaucoup plus écologique.

Le principe en est donné à la figure V.25. L'air extérieur entre en pignon du bâtiment. La toiture joue le rôle de surface absorbante en étant peinte d'une couleur foncée. Un isolant est placé à quelques centimètres en dessous de cette toiture. Entre les deux circule l'air aspiré par un ventilateur. Une couverture transparente peut être installée en sur-toiture afin d'améliorer le rendement de l'installation. La température de l'air extérieur s'échauffe de quelques degrés entre son entrée sous toiture et sa sortie vers la cellule de séchage. Celle-ci est formée de caillebotis, ce qui permet la libre circulation de l'air de bas en haut. Le produit à sécher est étalé sur ces caillebotis afin d'être traversé par l'air soufflé. Cet air est ensuite expulsé à l'extérieur

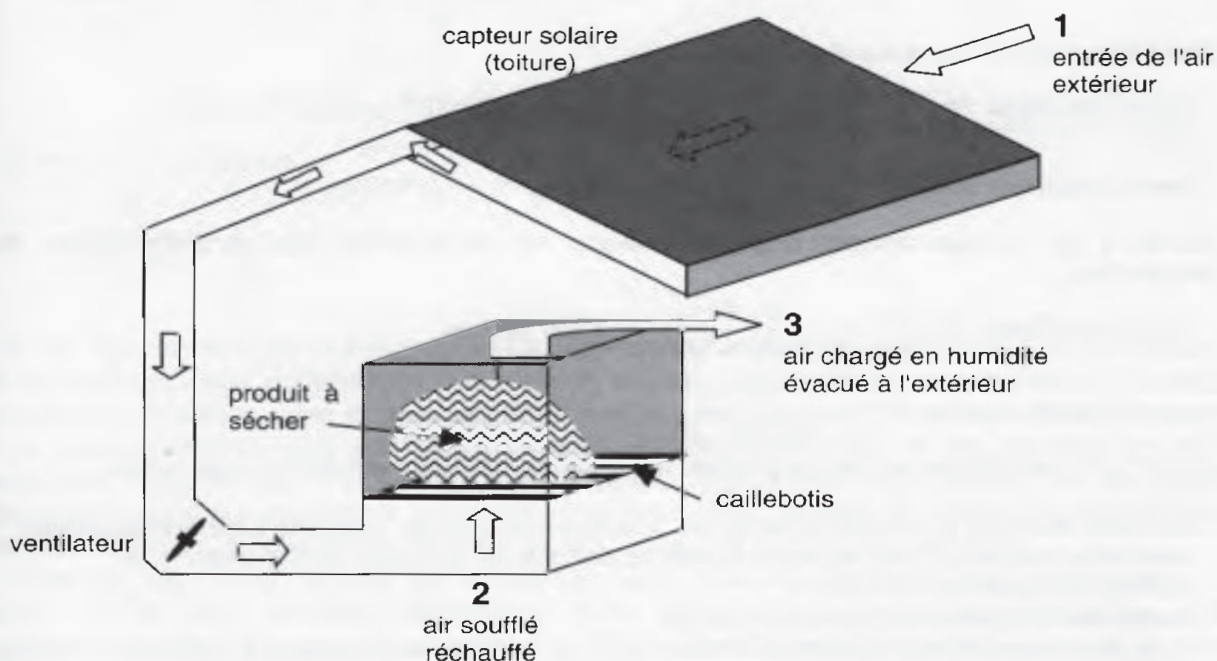


Figure V.25 – Schéma de principe d'une installation de séchage en grange avec apport solaire.

*** Application V.9**

Considérons une installation de séchage en grange ayant les caractéristiques suivantes

- masse de fourrage à traiter $M=200$ tonnes
- humidité du fourrage 50% en masse
- humidité recherchée en fin de séchage 10 %
- ventilateurs débit volumique $\dot{V}_a=12$ m³/s.

La masse d'eau à évacuer s'élève donc à $m_e = 200 \times (0,5-0,1) = 80$ tonnes.

Les caractéristiques de l'air sont données au tableau ci-dessous dans le cas sans chauffage et dans le cas d'un chauffage solaire. Les caractéristiques de l'air extérieur sont indicées par 1. L'entrée dans la cellule de séchage est indicée par 2 et la sortie par 3.

On y trouve les grandeurs suivantes¹

- T température sèche,
- ϕ humidité relative,
- v volume massique (en m³/kg d'air sec),
- ω humidité absolue (en g/kg d'air sec),
- h enthalpie (en kJ/kg d'air sec).

point	T °C	ϕ %	v m ³ /kg	ω g/kg	h kJ/kg
1	18	70	0,836	9,1	41
sans chauffage solaire					
2	18	70	0,836	9,1	41
3	18	80	0,838	10,4	44
avec chauffage solaire					
2	22	55	0,848	9,1	45
3	20	80	0,846	11,8	50

Débit massique d'eau évacué par l'air

- sans chauffage $\dot{m}_e = \frac{\dot{V}_a}{v_2} (\omega_3 - \omega_2) = \frac{12}{0,836} (10,4 - 9,1) 10^{-3} = 0,0187$ kg/s

- avec chauffage solaire $\dot{m}_e = \frac{12}{0,848} (11,8 - 9,1) 10^{-3} = 0,0382$ kg/s

Durée t de fonctionnement des ventilateurs, en considérant les caractéristiques de l'air constantes

- sans chauffage $t = \frac{m_e}{\dot{m}_e} = \frac{80 \cdot 10^3}{0,0187 \times 3600} = 1188$ heures

- avec chauffage solaire $t = \frac{80 \cdot 10^3}{0,0382 \times 3600} = 582$ heures

Donc, pour une même siccité du produit, le temps de séchage est diminué de moitié.

Calculons l'énergie E_s économisée grâce aux apports solaires, avec les données suivantes

- irradiation moyenne des capteurs durant la période de séchage $G=6$ kWh/m².jour
- surface de capteurs $S_c=400$ m²
- rendement moyen des capteurs $\eta_c=0,25$
- la durée moyenne journalière de fonctionnement des capteurs s'élève à $ddf=10$ h. Le séchage s'effectue donc en un peu plus de 58 jours.

$$E_s = \frac{G}{ddf} \cdot \eta_c \cdot S_c \cdot t = \frac{6}{10} \times 0,25 \times 400 \times 582 = 34920 \text{ kWh.}$$

¹ La connaissance de deux grandeurs, en général la température sèche T et l'humidité relative ϕ , permet de déterminer les autres quantités en utilisant un diagramme psychrométrique.

8. CLIMATISATION SOLAIRE

L'utilisation de l'énergie solaire pour faire de la climatisation semble toute indiquée car la correspondance de temps est alors parfaite : à une forte demande d'énergie pour climatiser les locaux correspond un apport élevé d'énergie solaire.

Il existe principalement deux systèmes pour produire du froid en vue d'une climatisation de locaux¹ : le système à compression de vapeur d'un fluide frigorigène et le système à absorption.

Le principe de la *réfrigération par compression de vapeur* d'un fluide frigorigène est donné à la figure V.26.

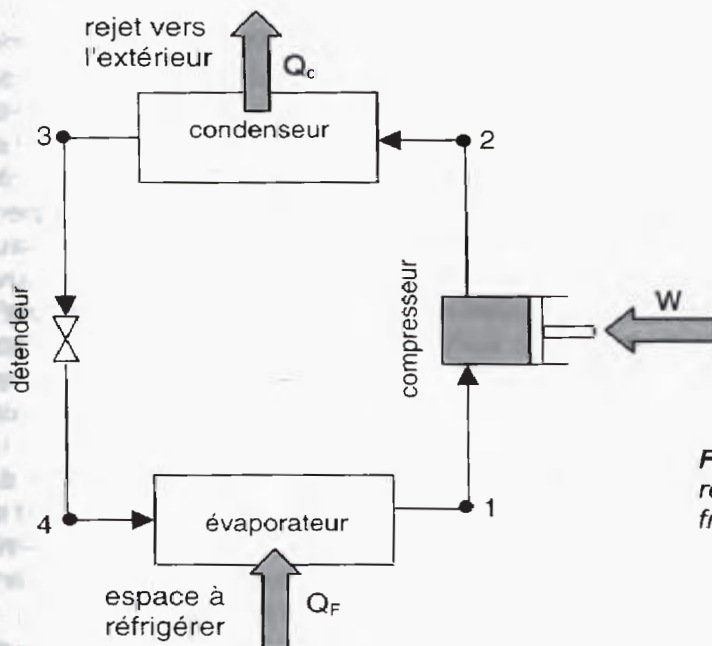


Figure V.26 – Schéma de principe de la réfrigération par compression d'un fluide frigorigène.

Un fluide frigorigène (R134a par exemple) est comprimé, sous forme vapeur (évolution 1-2), puis est refroidi dans un premier échangeur, appelé condenseur, où il transmet l'énergie Q_c à une source froide qui est le plus souvent l'air ambiant ou une circulation d'eau (évolution 2-3). La vapeur condensée est alors détendue (évolution 3-4). Il en résulte un mélange diphasique (liquide-gaz) à basse température. Le fluide frigorigène va se vaporiser entièrement dans un deuxième échangeur, appelé évaporateur, en prélevant l'énergie Q_F au milieu environnant qu'il refroidit (évolution 4-1). C'est la partie utile du cycle.

De l'énergie doit être fournie au système pour faire fonctionner le compresseur. Cette énergie W , le plus souvent électrique, peut être fournie par des photopiles solaires. On définit le *coefficient de performance* ou COP (*Coefficient Of Performance*) de la machine par le rapport de l'énergie frigorigène fournie sur l'énergie consommée. On a donc

$$\text{COP} = \frac{Q_F}{W}$$

Mais il semble plus judicieux d'utiliser un *cycle frigorifique à absorption* qui permet d'utiliser l'énergie solaire sous forme thermique plutôt que sous forme électrique, la

¹ On peut citer la méthode de réfrigération par évaporation d'eau. Mais cette façon de procéder entraîne une modification de l'humidité de l'air, ce qui ne peut être envisagé que si, d'une part, l'air est suffisamment sec et, d'autre part, s'il est renouvelé en continu.

transformation de l'énergie rayonnée par le Soleil en énergie électrique se faisant avec un rendement ne dépassant pas 15 %.

Le schéma de principe d'un système à absorption est donné à la figure V.27. On utilise la propriété qu'ont certains gaz de se dissoudre dans un liquide sous certaines conditions de température et de pression.

Les fluides le plus souvent utilisés sont le couple ammoniac-eau ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) et le couple bromure de lithium-eau ($\text{LiBr-H}_2\text{O}$). Dans la combinaison $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, l'ammoniac est le fluide réfrigérant, l'eau étant l'absorbant. Dans la combinaison $\text{LiBr-H}_2\text{O}$, c'est l'eau qui joue le rôle de fluide réfrigérant tandis que le bromure de lithium est l'absorbant.

Dans un tel système, la partie compresseur est remplacée par un circuit composé d'un bouilleur, d'un économiseur (facultatif), d'une pompe et d'un absorbeur.

Prenons le cas d'un système fonctionnant au couple ammoniac-eau. Dans le bouilleur, la solution s'appauvrit en ammoniac. Sous l'effet de la température, celui-ci dégaze sous une pression élevée. Ce gaz ammoniac joue alors le rôle habituel de tout fluide frigorigène : il passe successivement dans un condenseur où il perd la chaleur Q_c , puis dans un détendeur (régleur), puis dans un évaporateur, où il produit du froid en prélevant la chaleur Q_{ev} et s'en retourne, à basse pression, vers l'absorbeur où il est de nouveau absorbé par l'eau appauvrie en provenance du bouilleur. La réaction d'absorption de l'ammoniac dans l'eau étant exothermique, il est nécessaire d'évacuer la chaleur Q_a produite. La solution enrichie, ainsi formée dans l'absorbeur, à basse pression est envoyée au moyen d'une pompe au bouilleur où règne une haute pression. Un économiseur (échangeur de chaleur) préchauffe la solution enrichie avant qu'elle n'arrive au bouilleur, au détriment de la solution appauvrie qui est envoyée à l'absorbeur. C'est au niveau du bouilleur que de l'énergie doit être fournie au système. Ce qui est intéressant ici c'est que cette énergie Q_b à fournir l'est sous forme thermique et par suite peut être d'origines diverses : hydrocarbures, vapeur, et, bien sûr, énergie solaire. On peut imaginer, par exemple, que cette dernière soit fournie au bouilleur par de l'eau chauffée dans des capteurs plans.

Notons que les températures à l'absorbeur et au condenseur sont directement liées à la température de la source froide utilisée (couramment l'air ambiant ou l'eau du réseau) qui permet d'évacuer la chaleur Q_c ainsi que la chaleur Q_a . Si cette température est trop élevée, il en sera de même de la température en sortie du condenseur et le réfrigérant risque de n'être pas entièrement condensé (dans le cas d'ammoniac par exemple) à moins de surdimensionner l'échangeur. Quant au niveau de l'absorbeur, une température de source froide trop élevée peut entraîner une mauvaise absorption du réfrigérant par l'absorbant mal refroidi.

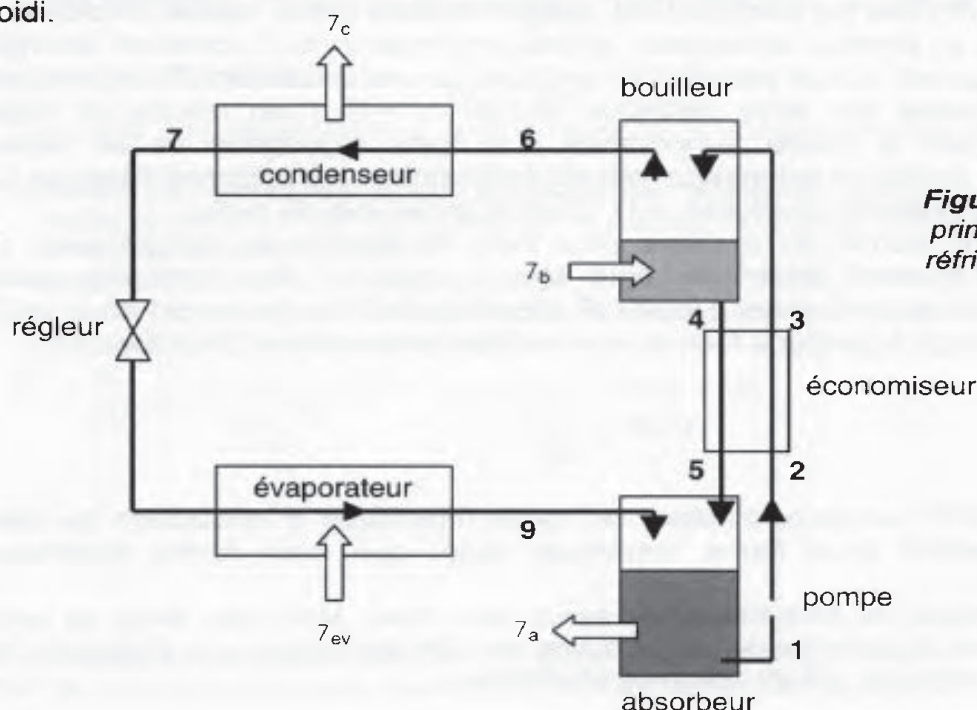


Figure V.27 – Schéma de principe d'un système de réfrigération à absorption.

Aux températures relativement basses que permettent les systèmes solaires sans concentration ($T \approx 90^\circ\text{C}$), il apparaît que le couple $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ est le mieux adapté. Un système $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ nécessite des températures de l'ordre de 130°C que ne peut pas fournir un capteur solaire plan. Le COP d'un système de réfrigération au bromure de lithium sera donc plus élevé que celui fonctionnant à l'ammoniac pour une même température au bouilleur. De plus le système $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ nécessite des pressions plus basses que celui à l'ammoniac ce qui permet de réduire la puissance de la pompe. Autre avantage, toujours par rapport à un système $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, il n'y a pas de restriction légale à son utilisation.

Il y a cependant quelques inconvénients au système $\text{LiBr-H}_2\text{O}$

- la température minimale à l'évaporateur ne doit pas descendre en dessous de 4°C pour éviter l'apparition de glace,
- il y a un risque de cristallisation dans le bouilleur où la solution est appauvrie en eau,
- le coût du bromure de lithium est élevé.

L'utilisation de capteurs solaires consiste à chauffer de l'eau qui est envoyée dans un échangeur situé dans le bouilleur. Là, elle perd ses calories au profit de la solution qui s'échauffe entraînant par là même l'évaporation du réfrigérant. Puis cette eau refroidie retourne aux capteurs. La variabilité de l'ensoleillement nécessite d'interposer un ballon de stockage entre les capteurs solaires et le système de réfrigération. Ceci permet de ne pas interrompre la climatisation durant un éventuel passage nuageux.

Accroître la température au bouilleur permet d'augmenter le COP. On peut envisager d'utiliser des capteurs à concentration, mais leur fonctionnement ne les rend pas économiquement exploitables. Par contre il existe des capteurs, appelés *capteurs à tubes sous vide*, qui permettent de dépasser les 100°C . Ils sont formés d'une série de tubes parallèles transparents, en général en verre, dans lesquels a été réalisé un vide poussé. Au milieu de chaque tube se trouve un tuyau coaxial soudé à une ailette jouant le rôle de surface absorbante. Il est possible d'orienter cette ailette pour améliorer la captation du rayonnement solaire. Dans le tuyau central circule une huile dont la température peut aisément dépasser les 100°C sans risque d'ébullition. Ce type de capteur solaire convient parfaitement à un système de climatisation à absorption.

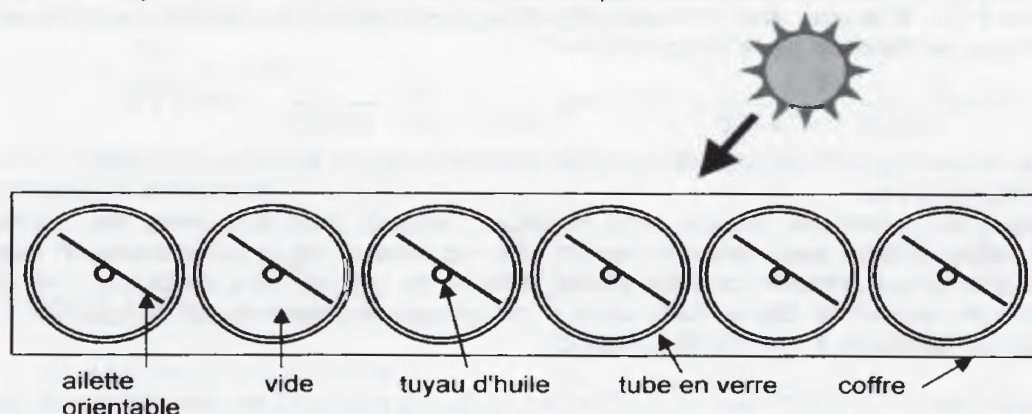


Figure V.28 – Coupe d'un capteur solaire à tubes sous vide.

Citons comme exemples

- le cas d'un hôtel, en Espagne, sur la Costa Blanca, pour lequel une puissance frigorifique de 125 kW est assurée par 386 m^2 de capteurs solaires à tubes sous vide. Un volume de 36 m^3 de stockage assure les transitoires,
- la climatisation d'une cave à vin (Banyuls-sur-mer) avec une puissance frigorifique de 52 kW fournie par 130 m^2 de capteurs à tubes sous vide,
- en Allemagne (Köln) un immeuble de bureaux climatisé par 176 m^2 de capteurs à tube sous vide fournissant une puissance frigorifique de 77 kW.

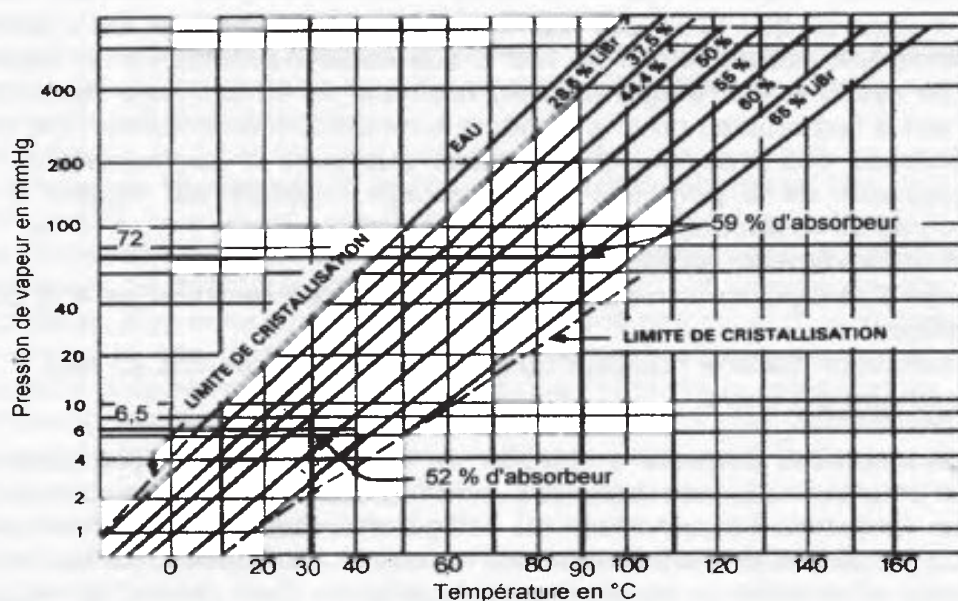


Figure V.29 –
Diagramme pression-
température des
solutions LiBr-H₂O
(Westinghouse)

* Application V.10

Un climatiseur solaire fonctionne avec un cycle à absorption au bromure de lithium et eau (LiBr-H₂O). Il doit pouvoir fournir une puissance frigorifique à l'évaporateur $Q_{ev}=125$ kW.

Les données, concernant les températures, sont les suivantes

$$T_1=T_2=30^\circ\text{C}$$

$$T_4=T_6=90$$

$$T_5-T_2=5^\circ\text{C} \text{ (fonction de l'efficacité de l'échangeur)}$$

$$T_7=45^\circ\text{C}$$

$$T_8=T_9=5^\circ\text{C}$$

On fait l'hypothèse que la pression régnant au point 7 correspond à la pression de vapeur d'eau saturante à T_7 . Il existe une formule empirique permettant de calculer la pression de vapeur saturante p_{vs} en fonction de la température T

$$p_{vs} = 611 \exp\left(\frac{T}{0,059 T + 13,706}\right) = 611 \exp\left(\frac{45}{0,059 \times 45 + 13,706}\right) = 9562 \text{ Pa.}$$

On fait la même hypothèse pour la pression régnant au point 9. On trouve alors

$$p_9=p_{vs}(5^\circ\text{C})=873 \text{ Pa.}$$

On néglige les pertes de charge dans le circuit, hormis, bien sûr, entre les points (4-5) où la solution, appauvrie en eau mais enrichie en LiBr, se détend¹ de la haute pression régnant dans le bouilleur à la basse pression de l'absorbeur; il en va de même entre les points (7-8) où se produit la détente de l'eau. Il ne règne donc dans le circuit qu'une haute pression à 9562 Pa (72 mmHg) et une basse pression à 873 Pa (6,5 mmHg).

La concentration x de LiBr dans la solution (en kg/kg de solution) est donnée par le diagramme de la figure V.29. Au départ de l'absorbeur (point 1), $T_1=30^\circ\text{C}$ et $p_1=6,5$ mmHg, d'où $x_1=52$ %. On a bien sûr $x_1=x_2=x_3$. À la sortie du bouilleur, la solution appauvrie en eau a pour caractéristiques $T_4=80^\circ\text{C}$ et $p_4=72$ mmHg. On en déduit $x_4=59$ %. Dans le reste du circuit (points 6 à 9) il n'y a pas de LiBr et par suite $x=0$.

Soit y le rapport du débit massique de la solution à celui de l'eau \dot{m}_6 (le réfrigérant) circulant à l'évaporateur. Pour les points 6 à 9, on a bien sûr $y=1$.

Les bilans de masse au niveau du bouilleur s'écrivent

$$\text{pour la solution} \quad \dot{m}_3=\dot{m}_4+\dot{m}_6$$

$$\text{et pour le LiBr} \quad x_3 \dot{m}_3=x_4 \dot{m}_4 + x_6 \dot{m}_6 \quad \text{avec } x_6=0.$$

¹ Le détendeur n'est pas représenté sur la figure V.27

On trouve $y_3 = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_6} = \frac{x_4}{x_4 - x_3} = \frac{59}{59 - 52} = 8,43$ et $y_4 = \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_6} = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_6} - 1 = 7,43$

La détermination des enthalpies h (en kJ/kg) est effectuée grâce aux formules ci-dessous.

Pour une solution à la température T ayant une concentration x en LiBr (points 1 à 5), on a

$$h(x, T) = 1744 x^2 - 1911 x + 285 + (2,01 x^2 - 5,15 x + 4,23) T$$

Pour l'eau liquide $h_7 = 4,185 T_7 = 4,185 \times 45 = 188,3$ kJ/kg = h_8 puisque la détente (7-8) est isenthalpe.

Pour la vapeur d'eau (points 6 et 9) $h(T) = 1,842 T + 2501,3$.

La détermination de h_3 est effectuée en écrivant le bilan thermique de l'économiseur

$$h_3 = h_2 + \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_2} (h_4 - h_5) = h_2 + \frac{y_4}{y_2} (h_4 - h_5) = -174,6 + \frac{7,43}{8,43} (-65,2 + 169,2) = -82,9 \text{ kJ/kg.}$$

En utilisant la formule donnant $h(x, T)$, ce dernier résultat permet de remonter à la température T_3 qui n'avait pas été encore déterminée

$$T_3 = \frac{-82,9 - (1744 \times 0,52^2 - 1911 \times 0,52 + 285)}{2,01 \times 0,52^2 - 5,15 \times 0,52 + 4,23} = 73,6^\circ\text{C.}$$

Les débits massiques \dot{m} sont calculés à partir de la puissance de réfrigération demandée. On a

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_6 (h_9 - h_8). \text{ On en déduit le débit d'eau } \dot{m}_6 = \frac{\dot{Q}_{ev}}{h_9 - h_8} = \frac{125}{2510,5 - 188,3} = 0,0538 \text{ kg/s.}$$

Les autres débits se calculent en écrivant $\dot{m} = y \dot{m}_6$.

Les puissances échangées se calculent aisément

- au condenseur $\dot{Q}_c = \dot{m}_6 (h_7 - h_6) = 0,0538 \times (188,3 - 2667,1) = -133,4 \text{ kW}$

- à l'absorbeur $\dot{Q}_a + \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_1 h_1 = 0$

$$\dot{Q}_a = -0,0538 \times 2510,5 + 0,3999 \times 169,2 - 0,4538 \times 174,6 = -146,7 \text{ kW.}$$

- au bouilleur $\dot{Q}_b + \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_4 h_4 = 0$

$$\dot{Q}_b = 0,4538 \times 82,9 + 0,0538 \times 2667,1 - 0,3999 \times 65,2 = 155,1 \text{ kW.}$$

On vérifie le bilan thermique global du cycle $\dot{Q}_{ev} + \dot{Q}_c + \dot{Q}_a + \dot{Q}_b = 0$.

Le coefficient de performance de ce système de climatisation est égal au rapport de l'énergie prélevée à l'évaporateur sur l'énergie fournie au bouilleur

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{ev}}{\dot{Q}_b} = \frac{125}{155,1} = 0,806.$$

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats obtenus (les températures en gras correspondent aux données du problème).

point	état	T °C	p Pa	x %	y	h kJ/kg	\dot{m} kg/s
1	solution enrichie* à basse pression	30	873	52	8,43	-174,6	0,4538
2	sol. enrichie à haute pression	30	9562	52	8,43	-174,6	0,4538
3		73,6	9562	52	8,43	-82,9	0,4538
4	sol. appauvrie à haute pression	90	9562	59	7,43	-65,2	0,3999
5	sol. appauvrie à basse pression	35	873	59	7,43	-169,2	0,3999
6	vapeur d'eau surchauffée	90	9562	0	1	2667,1	0,0538
7	eau liquide à haute pression	45	9562	0	1	188,3	0,0538
8	eau et vapeur d'eau à basse pression	5	873	0	1	188,3	0,0538
9	vapeur saturée à basse pression	5	873	0	1	2510,5	0,0538

* enrichie sous-entend enrichie en eau et donc appauvrie en bromure de lithium

9. DISTILLATION SOLAIRE

Une application à basse température de l'énergie solaire est la distillation d'eau saumâtre.

Le principe en est très simple. De l'eau saumâtre est répandue en nappe de faible épaisseur sur des gradins de couleur sombre. Le rayonnement solaire chauffe cette eau qui s'évapore et vient se condenser sur une couverture transparente, en général une vitre. Cette dernière étant plus froide, puisque absorbant très peu le rayonnement solaire, la vapeur s'y condense. Cette eau propre glisse le long de la vitre inclinée puis est recueillie dans un réservoir en partie basse.

Les paramètres de ce type d'installation sont

- l'inclinaison i de la vitre si celle-ci est trop faible, l'eau ne glisse pas et retombe sur les marches; si elle est trop grande, la surface d'eau est bien sûr diminuée si on veut respecter des hauteurs qui ne soient pas prohibitives. Une valeur acceptable est $i \approx 15^\circ$
- la hauteur h d'eau dans chacune des marches on a intérêt à la rendre la plus faible possible, quitte à réaliser un asservissement pour l'alimentation de la marche la plus haute, les autres étant alimentées par ruissellement. Une hauteur d'eau saumâtre de 10 mm par exemple est acceptable. Elle est suffisamment faible pour ne pas entraîner une trop forte inertie thermique, défavorable dans le cas des distillateurs solaires.

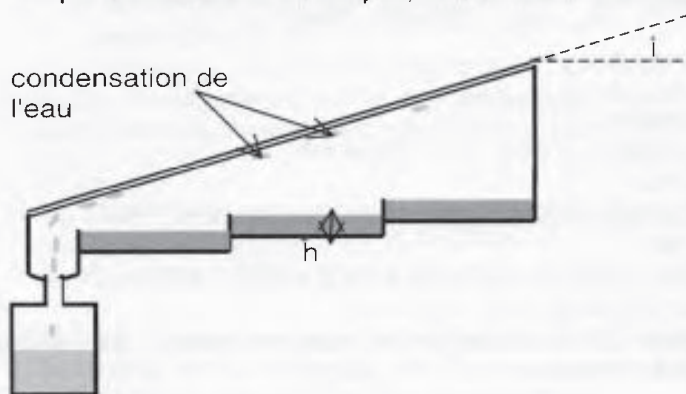


Figure V.30 – Coupe schématique d'un distillateur solaire plan. L'eau saumâtre, chauffée par le soleil, s'évapore puis se condense sur la vitre plus froide avant d'être recueillie dans le réservoir prévu à cet effet. La surface réceptrice est en marches d'escalier pour créer une grande surface d'évaporation.

Le rendement instantané η d'un tel système peut être défini comme étant le rapport de l'énergie nécessaire pour évaporer le débit d'eau distillée sur l'éclairement solaire G^* . Si on note \dot{v} le débit d'eau distillée et L_v la chaleur latente d'évaporation de l'eau, on a

$$\eta = \frac{\dot{v} L_v}{G^*}.$$

Figure V.31 - Distillateur solaire



10. ANALYSE ÉCONOMIQUE

L'énergie solaire est gratuite... Il est facile d'en déduire que son utilisation l'est aussi. Malheureusement ce n'est pas le cas lorsque le procédé mis en œuvre vient en remplacement ou en surplus d'une technique existante.

Dans le cas d'une habitation dont la baie du salon est orientée plein sud, toute l'énergie solaire qui entre par celle-ci est entièrement gratuite. L'existence même de la baie n'a rien à voir avec le chauffage. Par contre installer des capteurs solaires en toiture pour préparer de l'eau chaude sanitaire aura un coût qu'il est nécessaire de chiffrer.

Le problème est délicat sous nos latitudes tempérées car bien souvent l'énergie solaire n'est pas suffisante, l'hiver, pour fournir l'intégralité des besoins en chauffage. Il est souvent nécessaire de prévoir un appoint qui tend à accroître le coût global de l'énergie.

10.1 Paramètres

L'établissement du coût annuel d'une installation solaire de chauffage fait apparaître 4 postes principaux, chacun d'entre eux faisant intervenir un certain nombre de paramètres

1. le coût de la batterie de capteurs solaires : ce coût dépend bien évidemment de la surface choisie mais le coût unitaire peut varier avec cette surface, les fabricants ayant tendance à baisser le prix au m² pour des commandes importantes.
2. le coût des équipements : supports, tuyauteries, pompes, système de contrôle, stockage, isolation... On peut le considérer, dans une certaine mesure, comme variant assez peu avec la surface de capteurs.
3. le coût de fonctionnement : énergie, pièces détachées, main d'œuvre... Il est fonction du système (actif ou passif), du fluide caloporteur (air ou eau) et de la qualification des usagers qui peuvent réaliser ou non la maintenance.
4. la charge financière : intérêts des emprunts, taxes, aides (prime, prêt bonifié, crédit d'impôt...), assurance... Ces paramètres sont assez fluctuants étant liés aux évolutions politico-économiques. La méthode de calcul des intérêts d'emprunt est donnée au paragraphe suivant.

On définit l'indice de rentabilité IR comme le rapport des sommes économisées durant la durée de vie de l'installation sur le coût global de cette même installation. Si cet indice est supérieur à 1, le système solaire est rentable.

Il subsiste une incertitude majeure dans tout calcul d'optimisation d'une installation : c'est l'évolution du coût des différentes énergies à moyen et long terme. Comme on l'a vu, il est le plus souvent nécessaire de coupler une installation de chauffage solaire à une installation classique (charbon, gaz, fuel, bois, électricité...). Le coût de cette énergie d'appoint est variable. On peut raisonnablement s'attendre à une évolution à la hausse des énergies fossiles avec des fluctuations plus ou moins importantes (cf. les chocs pétroliers). Dans les calculs qui suivent, on n'a pas fait intervenir d'évolution du coût du kWh d'appoint. Il est néanmoins nécessaire de garder à l'esprit cette éventualité.

10.2 Intérêts des emprunts

Soit I_m le montant du remboursement (capital + intérêts), mensuel et constant, pour 1 euro emprunté. On a

$$I_m = \frac{i_m}{1 - (1 + i_m)^{-N_m}}$$

avec i_m : taux d'intérêt effectif global mensuel (TEG mensuel)

N_m : nombre de mois caractérisant la durée du remboursement.

Pour une année, le montant à rembourser pour 1 euro emprunté s'écrit $I_a = 12 I_m$. Le tableau ci-dessous donne la valeur de I_a pour des taux d'intérêt variant de 3 à 9 % sur des durées allant de 1 à 20 ans.

		taux d'intérêt i (en %)						
		3	4	5	6	7	8	9
durée d'amortissement A_0 (en années)	1	1,01632	1,02180	1,02729	1,03280	1,03832	1,04386	1,04942
	2	0,51577	0,52110	0,52646	0,53185	0,53727	0,54273	0,54822
	3	0,34897	0,35429	0,35965	0,36506	0,37053	0,37604	0,38160
	4	0,26561	0,27095	0,27635	0,28182	0,28735	0,29296	0,29862
	5	0,21562	0,22100	0,22645	0,23199	0,23761	0,24332	0,24910
	6	0,18232	0,18774	0,19326	0,19887	0,20459	0,21040	0,21631
	7	0,15856	0,16403	0,16961	0,17530	0,18111	0,18703	0,19307
	8	0,14075	0,14627	0,15192	0,15770	0,16360	0,16964	0,17580
	9	0,12692	0,13249	0,13821	0,14407	0,15008	0,15622	0,16251
	10	0,11587	0,12149	0,12728	0,13322	0,13933	0,14559	0,15201
	11	0,10685	0,11252	0,11837	0,12440	0,13061	0,13699	0,14353
	12	0,09933	0,10506	0,11099	0,11710	0,12341	0,12989	0,13656
	13	0,09299	0,09877	0,10477	0,11097	0,11737	0,12397	0,13076
	14	0,08756	0,09340	0,09946	0,10575	0,11225	0,11896	0,12587
	15	0,08287	0,08876	0,09490	0,10126	0,10786	0,11468	0,12171
	16	0,07877	0,08472	0,09092	0,09737	0,10406	0,11099	0,11814
	17	0,07516	0,08117	0,08744	0,09397	0,10076	0,10779	0,11506
	18	0,07197	0,07802	0,08436	0,09098	0,09786	0,10500	0,11237
	19	0,06911	0,07522	0,08163	0,08833	0,09530	0,10254	0,11003
	20	0,06655	0,07272	0,07919	0,08597	0,09304	0,10037	0,10797

Tableau V.3 – Versement constant annuel I_a en euro pour 1 € emprunté.

10.3 Équations

On note

S_c la surface de capteurs (en m^2)

C_c le coût du m^2 de capteur solaire (€/m²)

C_{eqs} le coût des équipements (€)

C_{efs} le coût du kWh d'énergie de fonctionnement, le plus souvent électrique (€/kWh)

E_{fs} l'énergie annuelle nécessaire pour faire fonctionner l'installation (€/an)

C_{ms} le coût annuel de la maintenance de l'installation, pièces et main d'œuvre (€/an)

Le coût global annuel s'écrit

$$C_{sa} = (C_c S_c + C_{eqs}) I_a + C_{efs} E_{fs} + C_{ms}$$

Si la surface S_c est petite, le coût des équipements peut être relativement important car peu sujet aux variations de surface de capteurs. Mais si la surface S_c est grande, l'installation peut devenir surdimensionnée à certains moments de l'année, compte tenu des besoins thermiques et de l'ensoleillement. On voit donc que l'apport énergétique solaire n'est pas simplement proportionnel à la surface de capteurs et qu'il existe une surface optimale qui délivrera le kWh solaire au moindre coût.

Une formule similaire à celle écrite plus haut donne le coût global de l'énergie complémentaire C_{aa}

$$C_{aa} = (C_{ca} + C_{eqa}) I_a + C_{efa} E_{fa} + C_{ma} + C_{ea} E_a$$

avec	C_{ca}	coût de la chaudière relative à l'énergie d'appoint
	C_{eqa}	coût des équipements
	C_{efa}	coût du kWh d'énergie de fonctionnement
	E_{fa}	énergie annuelle nécessaire au fonctionnement (en kWh)
	C_{ma}	coût annuel de maintenance
	C_{ea}	coût du kWh de l'énergie d'appoint
	E_a	énergie annuelle nécessaire en appoint du solaire (en kWh)

Le coût total annuel du chauffage s'écrit alors

$$C_{ta} = C_{sa} + C_{aa}$$

10.4 Optimisation d'une installation solaire

Cherchons à présent à optimiser une installation solaire. Il faut pour cela trouver la surface optimale de capteurs en cherchant le minimum de la fonction $C_{ta}(S_c)$. Pratiquement, on peut faire les hypothèses suivantes

- le chauffage d'appoint conventionnel a un coût d'achat, de fonctionnement et de maintenance qui est pratiquement indépendant de S_c ,
- l'énergie E_{fs} nécessaire au fonctionnement de l'installation solaire est le plus souvent très faible et peut être négligée,
- le coût de maintenance de l'installation solaire C_{ms} est elle aussi le plus souvent négligeable.

Le problème revient donc à minimiser la fonction $F(S_c)$ suivante

$$F(S_c) = (C_c S_c + C_{eqs}) I_a + C_{ea} (E_t - E_s)$$

où E_t est l'énergie totale nécessaire au chauffage

E_s est l'énergie apportée par les S_c m² de capteurs.

On détermine alors la dérivée par rapport à S_c de la fonction $F(S_c)$. Puis l'on calcule la surface optimum de capteurs solaires S_{co} à partir de l'égalité $\frac{dF}{dS_c} = 0$

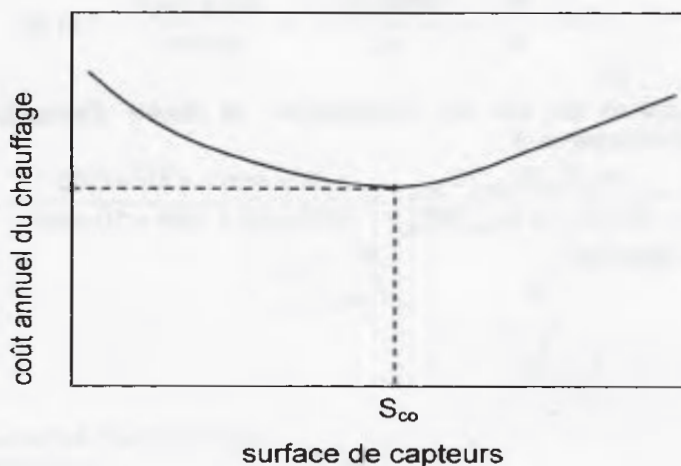


Figure V.32 – Allure de la courbe représentant le coût annuel d'un système de chauffage en fonction de la surface de capteurs. Le minimum de cette courbe détermine la surface optimale de capteurs solaires à installer.

*** Application V.11**

Soit à optimiser la surface de capteurs nécessaire au chauffage d'eau chaude sanitaire d'un lycée de 200 élèves. Chaque élève consomme 30 litres d'eau chaude à 45°C par jour. Celle-ci arrive au système de chauffage à la température de 23°C. L'internat du lycée est ouvert 235 jours par an. L'énergie nécessaire E_t se monte donc à

$$E_t = 200 \times 0,03 \times 1000 \times 4,185 \times (45-23) \times 235 = 129,819 \cdot 10^6 \text{ kJ/an} = 36061 \text{ kWh/an.}$$

Données	durée d'amortissement	$A_0=15$ ans
	taux d'intérêt annuel	$i=5\%$
	coût du kWh d'appoint	$C_{ea}=0,08$ €/kWh
	coût du m ² de capteur	$C_c=260$ €/m ²
	coût des équipements	$C_{eqs}=366+10 S_c$ (€)
	apport solaire annuel	$E_s=4053 \sqrt{S_c}$ (kWh), au delà de 20 m ² de capteurs.

Le nombre de mois de remboursement à versement constant s'élève à $N_m=15 \times 12=180$ mois

Le taux d'intérêt effectif global mensuel vaut $i_m=5/12 \%$

Le montant du remboursement mensuel et constant pour 1 € emprunté est donné par

$$I_m = \frac{0,05}{12} \cdot \frac{1}{1 - \left(1 + \frac{0,05}{12}\right)^{-180}} = 0,007908$$

ce qui donne le montant annuel à rembourser pour 1 € emprunté

$$I_a = 12 I_m = 12 \times 0,007908 = 0,0949 \text{ valeur que l'on peut retrouver au tableau V.3.}$$

La fonction à optimiser s'écrit alors

$$F(S_c) = (260 S_c + 366 + 10 S_c) 0,0949 + 0,08 (36061 - 4053 \sqrt{S_c})$$

La surface optimale S_{co} est déterminée en calculant $\frac{dF}{dS_c} = 25,623 - \frac{162,12}{\sqrt{S_c}}$

En écrivant $\frac{dF}{dS_c} = 0$, on obtient la surface optimale $S_{co}=40 \text{ m}^2$

Le taux de couverture solaire (TCS), qui est égal à l'énergie fournie par les capteurs sur l'énergie totale nécessaire, s'élève ici à

$$TCS = \frac{E_s}{E_t} = \frac{4053 \sqrt{S_{co}}}{E_t} = \frac{4053 \sqrt{40}}{36061} = 71,1 \%$$

En prenant comme durée de vie de l'installation, la durée d'amortissement A_0 , l'indice de rentabilité de l'installation s'élève à

$$IR = \frac{A_0 \cdot E_s(S_{co}) \cdot C_{ea}}{C_c \cdot S_{co} + C_{eqs}(S_{co})} = \frac{15 \times 4053 \sqrt{40} \times 0,08}{260 \times 40 + 366 + 10 \times 40} = 2,75.$$

L'installation est donc rentable.



CHAPITRE VI

LES CAPTEURS À CONCENTRATION

Si l'on veut produire du travail à partir de l'énergie solaire, il faut atteindre des températures de source chaude plus élevées que celles rencontrées avec les capteurs plans. Le rendement de Carnot η_c est là pour nous le rappeler $\eta_c = 1 - \frac{T_f}{T_c}$ où T_f est la température de la source froide et T_c celle de la source chaude. Pour cela il est nécessaire de concentrer le rayonnement solaire au moyen de surfaces optiques ce qui élimine en pratique l'énergie rayonnée de façon diffuse. Une orientation permanente et précise du capteur s'avère nécessaire pour obtenir un bon rendement. Un système de captation de l'énergie solaire avec concentration sera donc le plus souvent un système dynamique.

1. DESCRIPTION

1.1 Définitions

La figure VI.1 définit les différentes grandeurs géométriques que l'on peut rencontrer dans la description des capteurs à concentration.

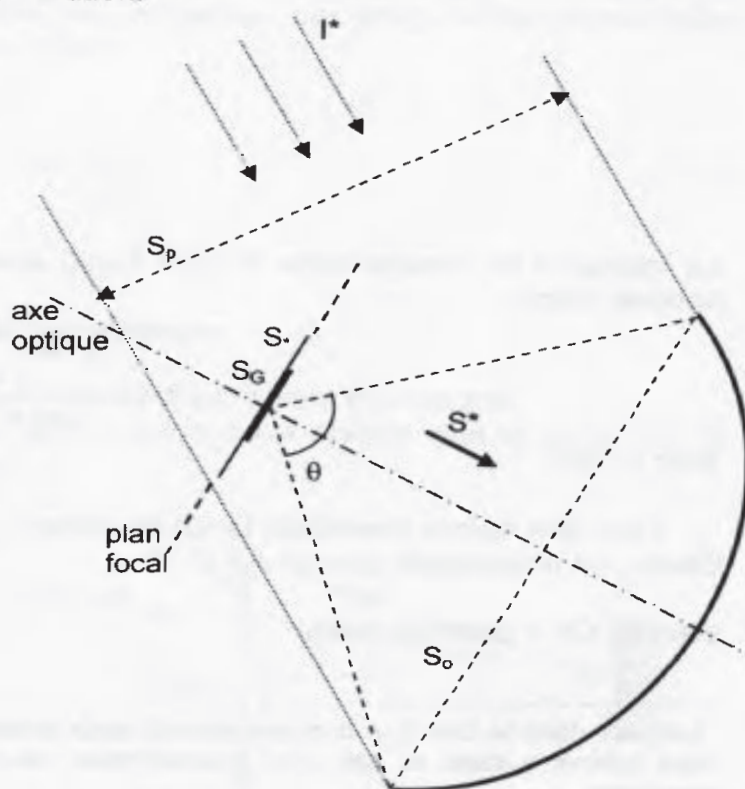


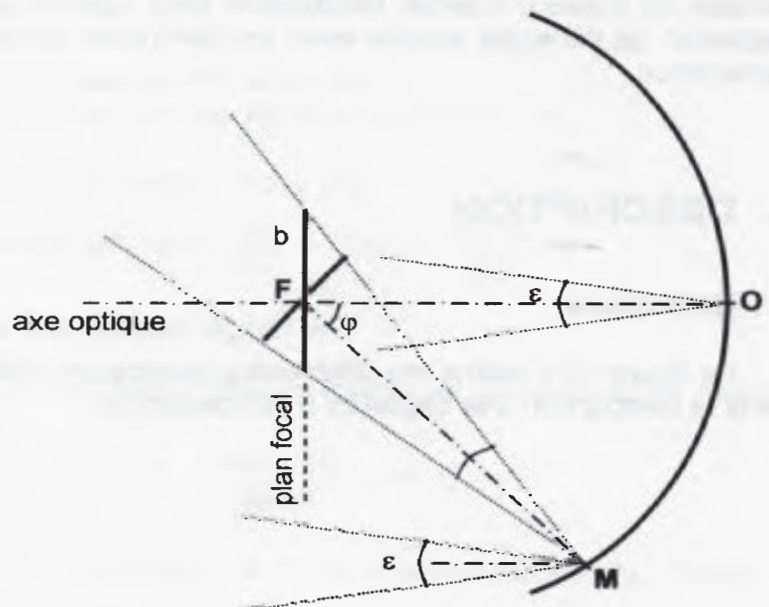
Figure VI.1 – Schéma d'un capteur solaire à concentration.

On y trouve les grandeurs suivantes

- θ angle d'ouverture du concentrateur; c'est l'angle dont on voit le concentrateur à partir du plan focal. Il est relevé dans un plan contenant l'axe optique et dépend de l'orientation de ce plan, sauf pour les concentrateurs de révolution.
- I^* éclairement solaire,
- S^* éclairement direct dans la section d'ouverture du concentrateur,
- S_0 section d'ouverture (ou encore *ouverture*) du concentrateur caractérisée par l'angle θ ,
- S_p section de passage du rayonnement solaire entrant dans le concentrateur S_p se confond avec S_0 quand l'axe optique du concentrateur est dirigé vers le soleil,
- S_G surface de l'*image de Gauss* du soleil; c'est l'image nette du soleil dans le plan focal donnée par des rayons paraxiaux, c'est-à-dire des rayons proches de l'axe optique,
- S surface de l'image réelle du soleil dans le plan focal.

Considérons le réflecteur à 2 dimensions de la figure VI.2; c'est un cylindre, supposé de longueur infinie.

Figure VI.2 – Représentation, dans le plan focal d'un concentrateur cylindrique, de l'image d'une source vue sous un angle ε .



La largeur b de l'image dans le plan focal, donnée par des rayons éloignés de l'axe optique, s'écrit

$$b = \frac{2 r \tan\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}{\cos \varphi}$$

avec $r = MF$

Pour des rayons paraxiaux ($\varphi=0$) on obtient, par définition, la largeur¹ de l'image de Gauss, en remarquant que $\tan \varepsilon \approx \varepsilon$

$$b_G = f \varepsilon$$

avec $f = OF =$ distance focale.

¹ Largeur dans le cas d'un concentrateur à deux dimensions (cylindro-parabolique par exemple), mais diamètre dans le cas d'un concentrateur de révolution (sphérique ou parabolique par exemples).

Ainsi, pour un capteur de 10 m de focale, l'image de Gauss du soleil aura une largeur

$$b_G = 10 \frac{32}{60} \frac{\pi}{180} = 9,3 \text{ cm}$$

On peut généraliser ainsi

la dimension b_G de l'image de Gauss du soleil est égal en centimètres à la distance focale en mètres.

On définit les quantités suivantes

- \dot{Q}_G^* flux solaire moyen dans l'image de Gauss

- C^* concentration énergétique

$$C^* = \frac{\dot{Q}_G^*}{S^*}$$

c'est une concentration moyenne, le flux solaire n'étant pas homogène dans l'image de Gauss.

- C_G concentration idéale

$$C_G = \frac{S_o}{S_G}$$

- η efficacité du concentrateur

$$\eta = \frac{C^*}{C_G}$$

- C concentration géométrique

$$C = \frac{S_o}{S}$$

- C_e^* concentration effective c'est la concentration énergétique réelle d'un système; elle tient compte des pertes dues aux réflexions, aux irrégularités géométriques et à la présence de masques éventuels.

- FF facteur de four

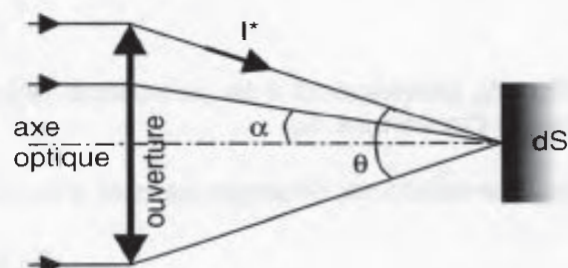
$$FF = \frac{C_e^*}{C^*}$$

1.2 Détermination de la concentration géométrique

Considérons tout d'abord le cas d'un concentrateur à trois dimensions.

Soit un système d'angle d'ouverture θ , avec l'axe optique orienté vers le Soleil (cf. fig. VI.3).

Figure VI.3 – Schéma d'un système concentrateur, d'angle d'ouverture θ , orienté vers la source.

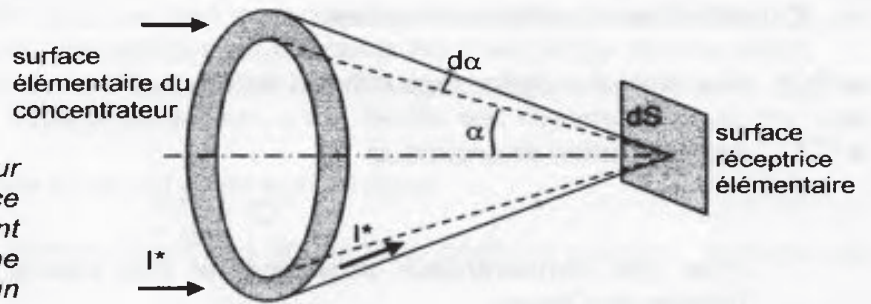


L'image du Soleil, formée sur la surface réceptrice élémentaire dS , est le siège d'un flux \dot{q}_\bullet qui s'écrit (en W/m^2)

$$\dot{q}_\bullet = \int_0^{\theta/2} I^* \cos \alpha \, d\Omega$$

où I^* représente l'intensité du rayonnement par unité de surface et par unité d'angle solide ($W/m^2.sr$). Le $\cos \alpha$ provient du fait que la composante utile est la composante normale à la surface réceptrice.

Figure VI.4 – Concentration, sur une surface réceptrice élémentaire dS , du rayonnement incident I^* tombant sur une surface élémentaire d'un concentrateur à trois dimensions.



L'angle solide élémentaire $d\Omega$ s'écrit

$$d\Omega = 2 \pi \sin \alpha \, d\alpha.$$

Il est défini par les intersections des deux cônes de demi-angle au sommet α et $\alpha + d\alpha$ avec la sphère unité.

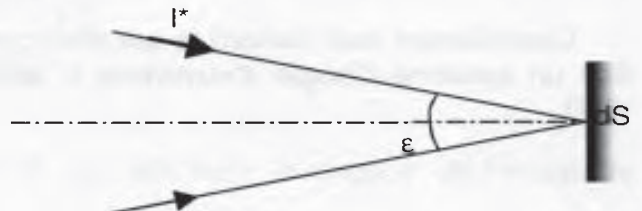
D'où, après intégration sur l'angle d'ouverture θ

$$\dot{q}_\bullet = \pi I^* \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

Dans le cas où il n'y a pas de concentrateur, le flux \dot{q}_0 reçu par m^2 correspond au cas précédent mais avec un angle d'ouverture réduit à l'angle sous lequel on voit la source, c'est-à-dire l'angle ε sous lequel on voit le Soleil de la Terre (cf. fig. VI.5). Il suffit donc de remplacer θ par ε . D'où

$$\dot{q}_0 = \pi I^* \sin^2 \frac{\varepsilon}{2}$$

Figure VI.5 – Schéma des rayons extrêmes en provenance du soleil vu sous l'angle ε .



Le flux \dot{q}_0 correspond à la puissance rayonnée par le Soleil et reçue par chaque mètre carré de l'ouverture S_0 .

La conservation de l'énergie permet d'écrire l'égalité suivante

$$S_0 \dot{q}_0 = S_\bullet \dot{q}_\bullet$$

La concentration géométrique C est par définition égale au rapport de l'ouverture S_0 sur la surface S_r de l'image du soleil se formant sur la surface réceptrice. On en déduit que la concentration géométrique peut aussi s'écrire

$$C = \frac{\dot{q}_r}{\dot{q}_0}$$

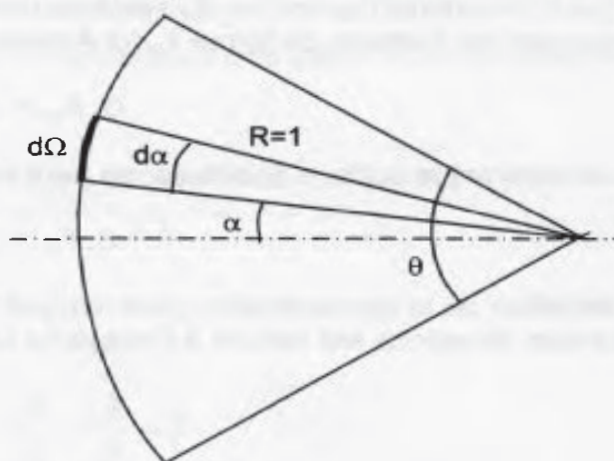
Dans le cas d'un concentrateur à trois dimensions (sphérique ou parabolique par exemples), cette concentration s'écrit

$$C = \frac{\sin^2 \frac{\theta}{2}}{\sin^2 \frac{\varepsilon}{2}}$$

Considérons à présent le cas d'un concentrateur à deux dimensions.

La concentration n'a lieu que suivant une seule direction, le système étant cylindrique, de longueur supposée unitaire (cf. fig. VI.6).

Figure VI.6 – Schéma servant à la détermination de l'angle solide $d\Omega$ dans le cas d'un concentrateur à deux dimensions, de longueur unitaire.



On a dans ce cas $d\Omega = R \, d\alpha \, 1 = d\alpha$
d'où

$$\dot{q}_r = \int_{-\theta/2}^{\theta/2} I^* \cos \alpha \, d\Omega = 2 I^* \sin \frac{\theta}{2}$$

Sans concentration, il suffit de remplacer, dans l'expression précédente, θ par ε et l'on obtient

$$\dot{q}_0 = 2 I^* \sin \frac{\varepsilon}{2}$$

On en déduit la concentration géométrique C

$$C = \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\sin \frac{\varepsilon}{2}}$$

1.3 Concentration géométrique maximale C_{\max}

Soit une source de rayonnement de surface diffuse S_s . Un système optique d'ouverture S_o concentre le rayonnement sur un récepteur de surface S_r (cf. figure VI.7).

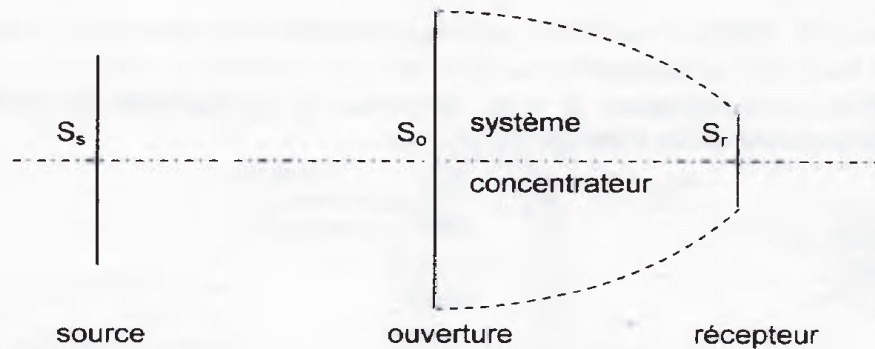


Figure VI.7 – Schéma d'un système concentrateur.

On peut considérer l'ouverture du système comme une surface noire. La loi de réciprocité concernant les facteurs de forme F_{ij} (cf Annexe D) permet d'écrire

$$S_s F_{so} = S_o F_{os}.$$

En considérant la surface S_r diffuse, on peut écrire

$$S_s F_{sr} = S_r F_{rs}.$$

La définition de la concentration géométrique C donne, dans le cas optimum pour lequel la surface réceptrice est réduite à l'image du Soleil ($S_r = S_*$)

$$C = \frac{S_o}{S_*} = \frac{S_o}{S_r} = \frac{F_{so} F_{rs}}{F_{sr} F_{os}}$$

Dans le cas idéal, tout rayonnement entrant dans le système atteint le récepteur. On a donc

$$F_{so} = F_{sr},$$

et comme on a toujours $F_{rs} < 1$, on peut écrire l'inégalité suivante

$$C < \frac{1}{F_{os}},$$

qui permet de définir la concentration maximale C_{\max} par l'égalité

$$C_{\max} = \frac{1}{F_{os}}$$

Considérons le cas d'un concentrateur à trois dimensions. Le facteur de forme F_{os} représente le rapport de l'énergie émise par l'ouverture et reçue par la surface S_s (le Soleil) sur l'énergie totale émise par l'ouverture, de surface très petite par rapport à celle du Soleil (cf. figure VI.8).

Soit I_d (en $W/m^2.sr$) l'intensité du rayonnement (fictif) émis de façon diffuse par S_o . I_d est constante et ne dépend pas de la direction d'émission. Par contre la composante reçue par S_s dépend de l'angle α d'émission et vaut $I_d \cos \alpha$.

L'énergie en provenance de l'angle solide $d\Omega$ et reçue par la surface S_s vaut

$$I_d \cos \alpha d\Omega.$$

On a déterminé, au paragraphe précédent, l'expression de l'angle solide élémentaire $d\Omega$, dans le cas d'un concentrateur à trois dimensions

$$d\Omega = 2 \pi \sin \alpha d\alpha.$$

Il ne reste plus qu'à écrire le rapport entre l'énergie reçue par S_s et l'énergie totale émise dans le demi-espace par la surface S_o , soit πI_d . On a donc

$$F_{os} = \frac{\int_0^{\epsilon/2} I_d \cos \alpha 2 \pi \sin \alpha d\alpha}{\int_0^{\pi/2} I_d \cos \alpha 2 \pi \sin \alpha d\alpha} = \frac{\int_0^{\epsilon/2} I_d \cos \alpha 2 \pi \sin \alpha d\alpha}{\pi I_d} = \sin^2 \frac{\epsilon}{2}$$

Pour une ouverture à deux dimensions, qui reste toujours très petite face aux dimensions du disque solaire ($d\Omega = d\alpha$), on trouve

$$F_{os} = \frac{\int_{-\epsilon/2}^{\epsilon/2} I_d \cos \alpha d\alpha}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_d \cos \alpha d\alpha} = \frac{\int_{-\epsilon/2}^{\epsilon/2} I_d \cos \alpha d\alpha}{2 I_d} = \sin \frac{\epsilon}{2}$$

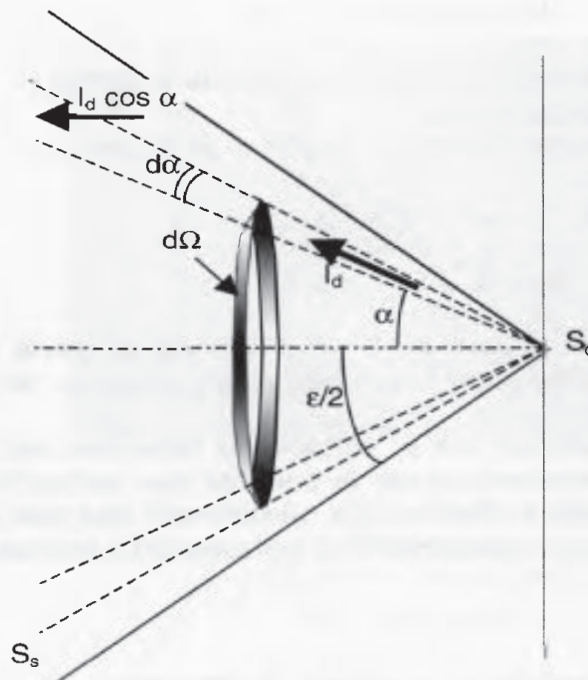


Figure VI.8 – Angle solide sous lequel est vu le Soleil (surface S_s) depuis l'ouverture du concentrateur (surface S_o).

L'angle ε est l'angle sous lequel on voit le Soleil à partir de la Terre

$$\varepsilon = 32' = \frac{32}{60} \times \frac{\pi}{180} = 9,3 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

On obtient ainsi

- pour un concentrateur à 3 dimensions

$$C_{\max} = 46165.$$

- pour un concentrateur à 2 dimensions

$$C_{\max} = 215.$$

Remarque on retrouve ces résultats en reprenant les formules donnant les concentrations géométriques déterminées au paragraphe 1.2 et en posant $\theta = \pi$ correspondant à l'ouverture maximale du capteur

Un système permettant d'obtenir la valeur C_{\max} de la concentration géométrique est appelé *concentrateur idéal*. Dans la pratique les valeurs maximales atteintes sont plus faibles compte tenu de la qualité optique des surfaces qui ne sont jamais parfaitement réfléchissantes.

1.4 Température maximale du récepteur

Soit une source de surface S_s rayonnant à la température T_s . La puissance \dot{Q}_o absorbée par un récepteur d'ouverture S_o s'écrit

$$\dot{Q}_o = \alpha_{\text{eff}}^* S_s \sigma T_s^4 F_{so}$$

avec α_{eff}^* le facteur d'absorption effectif de l'ouverture du système,
 σ constante de Stefan-Boltzmann,
 F_{so} le facteur de forme entre la surface émettrice et l'ouverture.

Le principe de réciprocité donne $S_s F_{so} = S_o F_{os}$

et par suite
$$\dot{Q}_o = \alpha_{\text{eff}}^* S_o F_{os} \sigma T_s^4$$

Cette quantité ne peut être que supérieure à la puissance recueillie par le récepteur, compte tenu des pertes éventuelles entre l'ouverture et la surface du récepteur

La température maximale T_r atteinte par la surface du récepteur est obtenue lorsque celui-ci est en équilibre thermodynamique par le seul fait des pertes thermiques, aucun autre prélèvement d'énergie n'étant effectué. En considérant que ces pertes sont dues exclusivement au phénomène de rayonnement, la puissance \dot{Q}_r perdue par ce mode de transfert s'écrit

$$\dot{Q}_r = \varepsilon \sigma T_r^4 S_r.$$

avec ε facteur d'émission infrarouge de la surface du récepteur,
 S_r surface émettrice du récepteur

On a donc l'inégalité suivante
$$\dot{Q}_r < \dot{Q}_o$$

et par suite

$$T_r < T_s \left[\frac{\alpha_{\text{eff}}^*}{\varepsilon} \frac{S_o}{S_r} F_{\text{os}} \right]^{1/4}$$

La température du récepteur sera maximale si sa surface correspond juste à celle de l'image du soleil; c'est-à-dire si l'on a

$$S_r = S_o$$

Mais le rapport S_o/S_r correspond à la définition de la concentration C du système et l'on a montré que le facteur de forme F_{os} est égal à l'inverse de la concentration maximale C_{max} . De plus on peut noter que lorsque la température T_r du récepteur se rapproche de la température T_s de la source, les facteurs d'émission ε et d'absorption α_{eff}^* tendent l'un vers l'autre (loi de Kirchhoff).

Finalement, on peut écrire

$$T_r < T_s \left[\frac{C}{C_{\text{max}}} \right]^{1/4}$$

et donc

$$T_r < T_s$$

La température du récepteur sera toujours inférieure à la température de la source, c'est-à-dire, dans notre cas, le Soleil. La température d'un récepteur solaire ne peut donc dépasser la température de 5770 K.

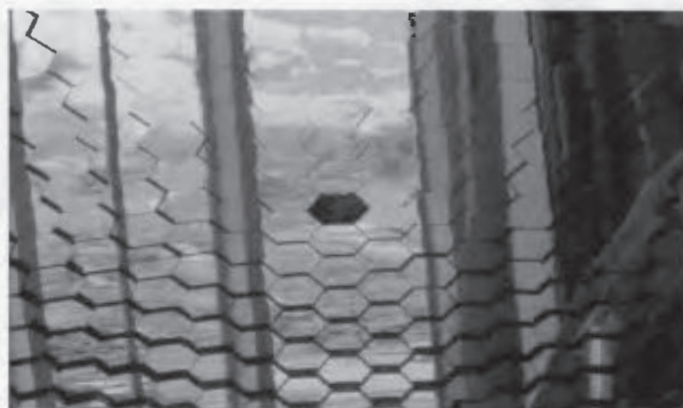


Figure VI.9 – Four solaire de 6,5 kW. le réflecteur est constitué d'une multitude de petits miroirs hexagonaux.

2. CONCENTRATEUR SPHÉRIQUE

2.1 Concentration idéale

Par définition $C_G = S_0/S_G$
avec ici $S_0 = \pi R^2 \sin^2 \alpha$ et

$$S_G = \pi f^2 \left(\frac{\varepsilon}{2} \right)^2$$

d'où

$$C_G = \left(\frac{4}{\varepsilon} \sin \alpha \right)^2$$

Cette surface est *astigmatique* les rayons incidents, parallèles à l'axe optique, ne convergent pas tous, après réflexion, en un même point. Ils sont tangents à une surface de révolution appelée *caustique d'aberration sphérique*.

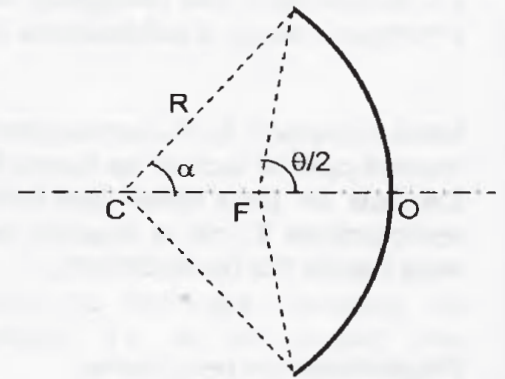


Figure VI.10 – Schéma en coupe d'un capteur sphérique.

2.2 Concentration géométrique

Le plan (P) correspond au cercle de moindre diffusion. C'est dans ce plan, et non dans le plan focal, que l'on aura intérêt à placer le récepteur si on désire une température élevée. En prenant pour S_0 la surface de ce cercle de moindre diffusion, la concentration géométrique est donnée par la formule suivante

$$C = \left[\frac{\sin \theta}{\sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin^2 \frac{\theta}{8} + \varepsilon} \right]^2$$

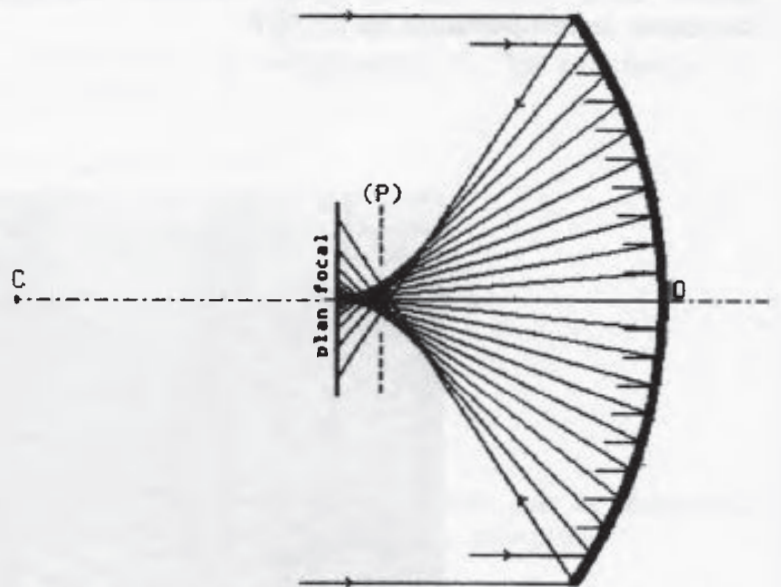


Figure VI.11 – Schéma caractérisant le plan (P) de moindre diffusion d'un capteur sphérique.

2.3 Concentration énergétique

La distribution de l'éclairement dépend du plan dans lequel on se place. Il en est donc de même de la concentration énergétique qui, de plus, n'est pas uniforme dans un plan

donné comme le montrent les figures ci-dessous pour le plan focal et le plan (P) de moindre diffusion.

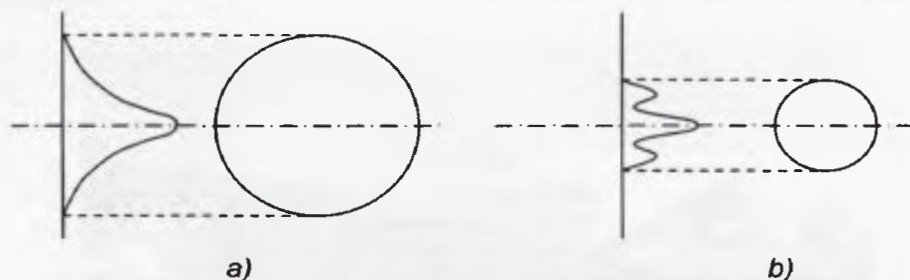


Figure VI.12 – Distribution relative de l'éclairement solaire
a) dans le plan focal
b) dans le plan de moindre diffusion (P)

*** Application VI.1**

Un miroir sphérique a une ouverture de 70 cm et un rayon de courbure de 6 m. Déterminons sa concentration idéale C_G ainsi que sa concentration géométrique C .

En appelant D_o le diamètre de l'ouverture, on a

$$\sin \alpha = \frac{D_o}{2R} = \frac{0,70}{2 \times 6} = 0,0583 \quad (\Rightarrow \alpha = 3,34^\circ)$$

et par suite

$$C_G = \left(\frac{4}{\varepsilon} \sin \alpha \right)^2 = \left(\frac{4}{9,3 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,0583 \right)^2 = 628$$

D'autre part

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{\frac{D_o}{2}}{R \cos \alpha - \frac{R}{2}} = \frac{\frac{0,7}{2}}{6 \cos 3,34^\circ - \frac{6}{2}} = 0,117 \Rightarrow \frac{\theta}{2} = 6,677^\circ$$

La concentration géométrique est donnée par

$$C = \left[\frac{\sin \theta}{\sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin^2 \frac{\theta}{8} + \varepsilon} \right]^2 = \left[\frac{\sin 13,35^\circ}{\sin 6,677^\circ \times \sin^2 1,669^\circ + 9,3 \cdot 10^{-3}} \right]^2 = 603$$

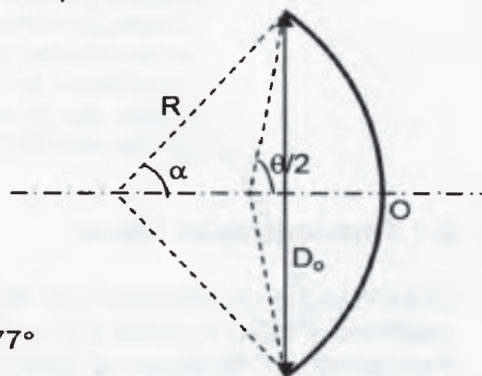


Figure VI.13 – Miroir sphérique du CNRS à Odeillo

3. CONCENTRATEUR PARABOLIQUE



Figure VI.14 – Batterie de capteurs THEK (Thermo-Hélio-Électrique-Kilowatt) à surface réfléchissante parabolique sur le site de la centrale Thémis à Targassonne (Pyrénées-Orientales) en 1983. On aperçoit la chaudière individuelle placée au foyer de chacun d'entre eux. La centrale a été arrêtée en 1986.

3.1 Concentration idéale

Considérons un paraboloïde de révolution. Cette surface est dite *stigmatique* tout rayon parallèle à l'axe optique converge, après réflexion, en un point F appelé *foyer*

Par définition, la distance focale vaut $f = CF = FO = OF'$

Une des propriétés de la parabole est l'égalité suivante, vraie pour tout point M situé sur la parabole $FM = MM'$

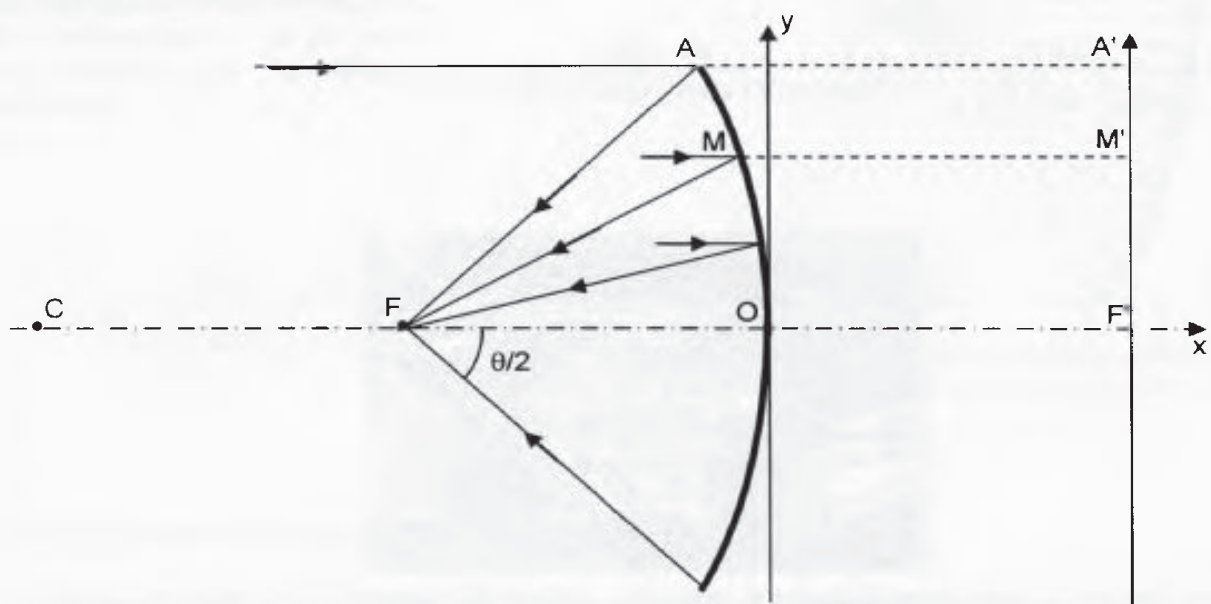


Figure VI.15 – Coupe méridienne d'un paraboloïde de révolution caractérisant la distance focale $f=CF=FO=OF'$ ainsi que l'angle d'ouverture θ . Les rayons parallèles à l'axe optique convergent tous vers le foyer F .

La concentration idéale peut être calculée en remarquant que

$$S_0 = \pi y_A^2 \text{ et que } S_G = \frac{\pi}{4} f^2 \varepsilon^2$$

De plus $\tan \frac{\theta}{4} = \frac{y_A}{2f}$, d'où finalement

$$C_G = \left(\frac{4}{\varepsilon} \tan \frac{\theta}{4} \right)^2$$

3.2 Concentration géométrique

Par définition $C = \frac{S_0}{S_\bullet}$

En se référant à la figure ci-dessous, on pose

$FJ=Y$ et $FA=\rho_0$.

L'image du soleil dans le plan focal a pour surface $S_\bullet = \pi Y^2$

La section d'ouverture, quant à elle, s'écrit $S_0 = \pi \rho_0^2 \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right)$

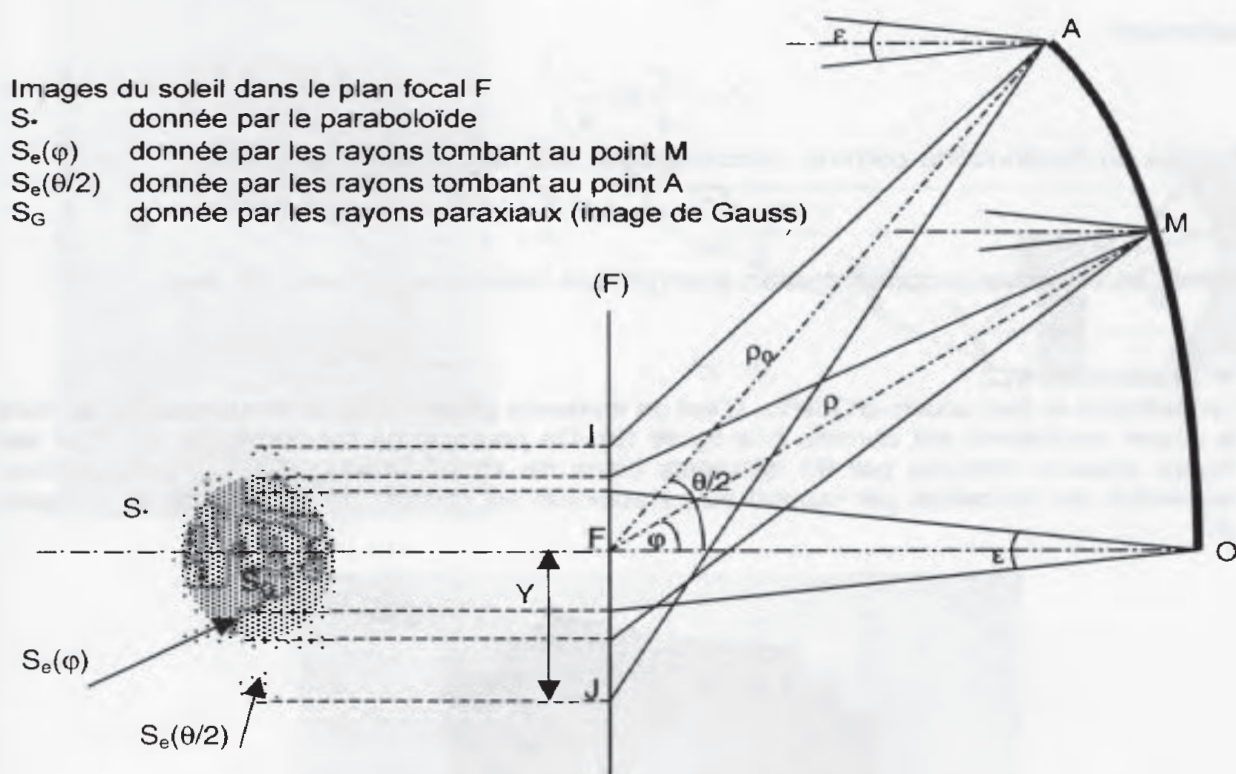


Figure VI.16 – Coupe méridienne d'un demi paraboloïde de révolution montrant les projections dans le plan focal de l'image du soleil.

L'angle ε étant très petit, on peut écrire $Y \approx \rho_0 \frac{\varepsilon}{2 \cos \left(\frac{\theta}{2} \right)}$

Finalement, il vient

$$C = \left(\frac{\sin \theta}{\varepsilon} \right)^2$$

3.3 Concentration énergétique

Par définition

$$C^* = \frac{Q_G^*}{S^*}$$

En se référant toujours à la figure précédente mais en considérant le point M, point courant de la trace du paraboloïde, l'angle que fait le rayon FM= ρ avec l'axe optique étant noté φ , la puissance reçue par une couronne élémentaire du paraboloïde s'écrit

$$dQ^* = S^* 2 \pi \rho \sin \varphi \rho d\varphi.$$

En supposant que cette puissance dQ^* est entièrement réfléchiée et répartie uniformément dans le plan focal (F), la fraction de cette puissance reçue dans l'image de Gauss s'écrit

$$dQ_G^* = dQ^* \frac{S_G}{S_e(\varphi)} = S^* 2 \pi f^2 \sin \varphi \cos \varphi d\varphi$$

La puissance totale reçue dans l'image de Gauss s'écrit

$$Q_G^* = \dot{Q}_G^* S_G = \int_0^{\theta/2} dQ_G^* = S^* \pi f^2 \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right)$$

et finalement

$$C^* = \left(\frac{2}{\varepsilon} \sin \frac{\theta}{2} \right)^2$$

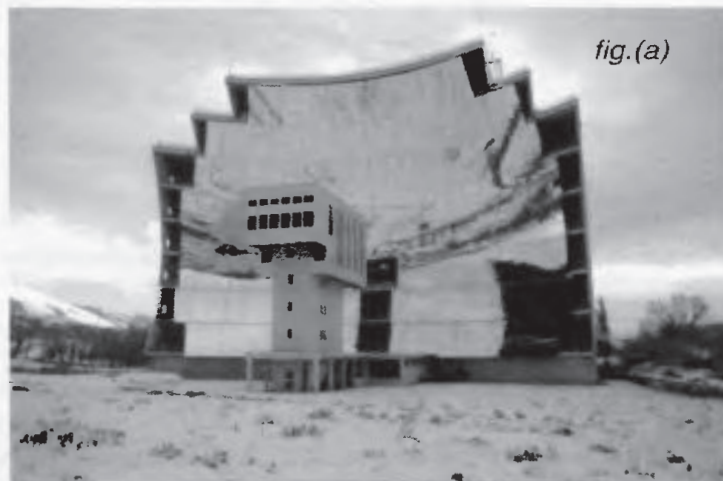
L'efficacité du paraboloïde comme concentrateur des rayons solaires s'écrit

$$\eta = \frac{C^*}{C_G} = \cos^4 \left(\frac{\theta}{4} \right)$$

Pour $\theta=\pi$, on retrouve la concentration énergétique maximale $C^*=46165$ avec $\eta=25\%$.

* Application VI.2

Considérons le four solaire d'Odeillo. C'est un immense paraboloïde de révolution (fig. a) dont la coupe méridienne est donnée à la figure (b). Ce paraboloïde fait converger au foyer les rayons solaires réfléchis par 63 héliostats plans de 45 m² chacun (fig. c). L'implantation respective des héliostats par rapport au paraboloïde est donnée par le schéma de la figure (d).



Le diamètre de l'image de Gauss du soleil est approximativement égal à
 $d_G = f \varepsilon = 18 \times 9,3 \cdot 10^{-3} = 17 \text{ cm}$
 et celui de la surface de l'image réelle du soleil

$$2Y \approx \rho_0 \frac{\varepsilon}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)} = \frac{27}{\sin 74^\circ} \frac{9,3 \cdot 10^{-3}}{\cos 74^\circ} = 95 \text{ cm}$$

À la figure(e), on peut remarquer le trou réalisé sur une plaque en acier placée au foyer du four. Ce trou a été fait en 3 minutes 30 secondes. Il correspond à l'image du soleil. Celle-ci n'est pas circulaire car le paraboloïde est tronqué dans sa partie inférieure; de plus la tour où se trouvent placées les expériences, crée un effet de masque pour le rayonnement solaire provenant des héliostats.

La concentration énergétique s'élève à

$$C^* = \left(\frac{2}{9,3 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \frac{\sin^2 74^\circ + \sin^2 40^\circ}{2} = 30866.$$

Sa concentration effective $C_e^* = 20000$. On en déduit le facteur de four $FF = 20000/30866 = 65 \%$.

Pour 1000 W/m^2 qui entrent par l'ouverture du paraboloïde en provenance des héliostats, on obtient au foyer $1000 \times 20000 = 2 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$ soit 2 kW/cm^2

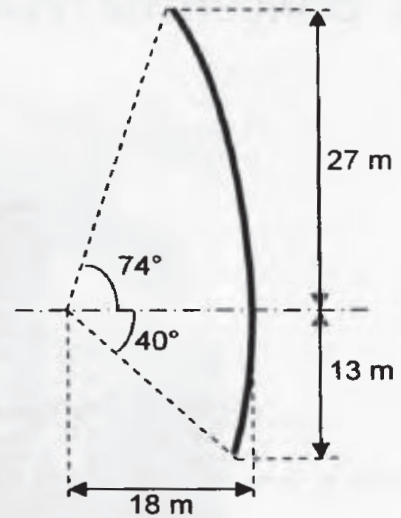


fig.(b)



fig.(c)



fig. (d)

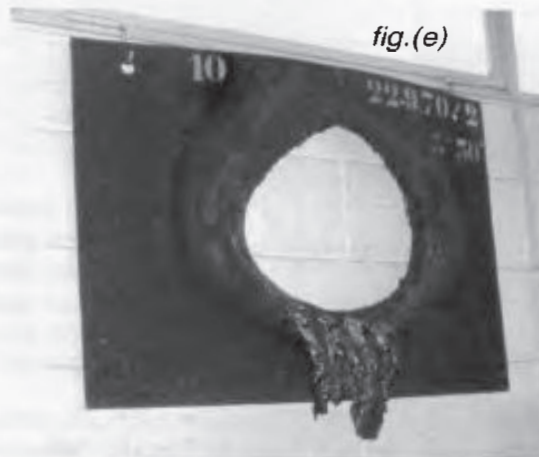


fig.(e)

4. CONCENTRATEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE

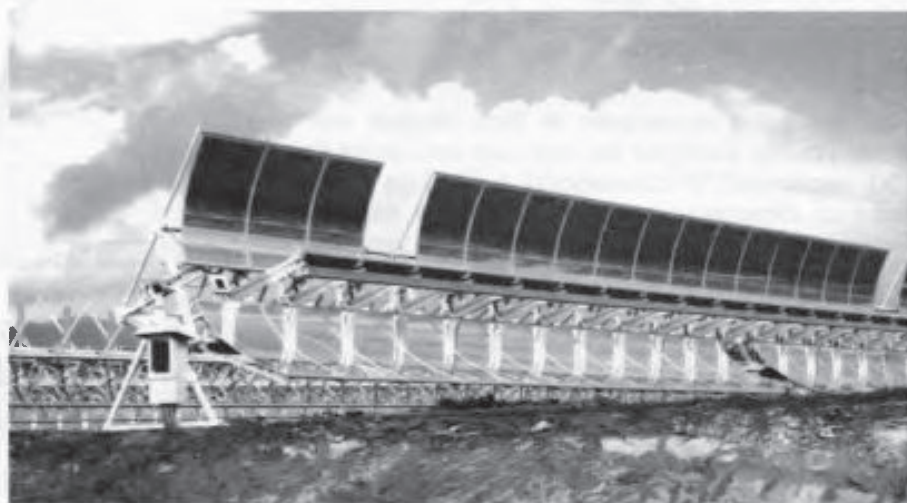


Figure VI.17 – Capteur cylindro-parabolique de l'Instituto Tecnológico y de Energías Renovables aux Canaries (Tenerife). La surface réfléchissante est formée d'éléments cintrés en métal poli. Au foyer se trouve un tube dans lequel circule un fluide caloporteur.

4.1 Concentration idéale

En appelant L la longueur du concentrateur, la section d'ouverture s'écrit

$$S_o = 4 f L \tan \frac{\theta}{4}$$

L'image de Gauss a pour surface $S_G = f \varepsilon$.

D'où la concentration idéale $C_G = S_o/S_G$

$$C_G = \frac{4}{\varepsilon} \tan \frac{\theta}{4}$$

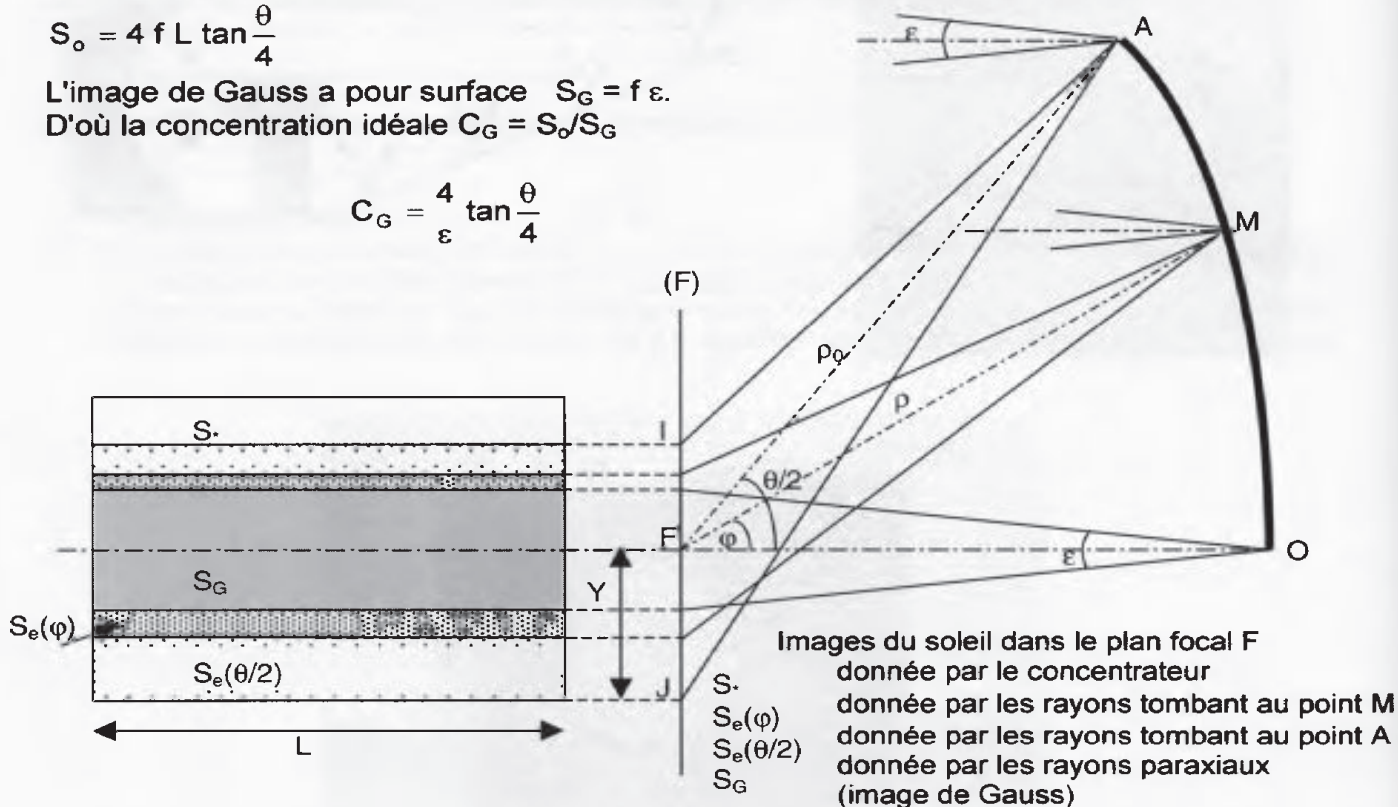


Figure VI.18 – Coupe méridienne d'un demi capteur cylindro-parabolique montrant les projections dans le plan focal de l'image du soleil.

4.2 Concentration géométrique

En posant $FJ=Y$ et $AF=\rho_0$, on a $Y \approx \frac{\rho_0 \varepsilon}{2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}$, $S_* = 2 Y L$, $S_o = 2 L \rho_0 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$

et comme $C = S_o/S_*$, on trouve

$$C = \frac{\sin \theta}{\varepsilon}$$

4.3 Concentration énergétique

La puissance reçue par une bande élémentaire de l'ouverture du capteur s'écrit

$dQ^* = S^* L \rho d\varphi$ avec $\rho = FM$ comme indiqué à la figure VI.16.

En supposant une répartition uniforme de l'énergie dans le plan focal et une surface réfléchissante parfaite, la fraction reçue dans l'image de Gauss s'écrit

$$dQ_G^* = dQ^* \frac{S_G}{S_e(\varphi)} = S^* L f \cos \varphi d\varphi.$$

La puissance totale reçue dans l'image de Gauss vaut alors

$$Q_G^* = \dot{Q}^* S_G = \int_{-\theta/2}^{\theta/2} dQ_G^* = 2 S^* L f \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

d'où

$$C^* = \frac{2}{\varepsilon} \sin \frac{\theta}{2}$$

La concentration énergétique sera maximale pour $\theta=\pi$ et on retrouve alors

$$C^* = 215 \text{ avec } \eta = 50 \%.$$

4.4 Montage

Il existe deux types de montage d'un capteur cylindro-parabolique

- 1 le montage suivant l'axe du monde le tube récepteur est parallèle à l'axe de rotation de la Terre. Le suivi du Soleil nécessite un simple asservissement en rotation autour de cet axe.

2. le montage est-ouest le tube récepteur est orienté est-ouest. Il faut orienter le capteur vers le soleil deux ou trois fois par jour pour optimiser la réception du rayonnement. Le rendement de captation est moins bon qu'avec le montage est-ouest asservi en rotation.

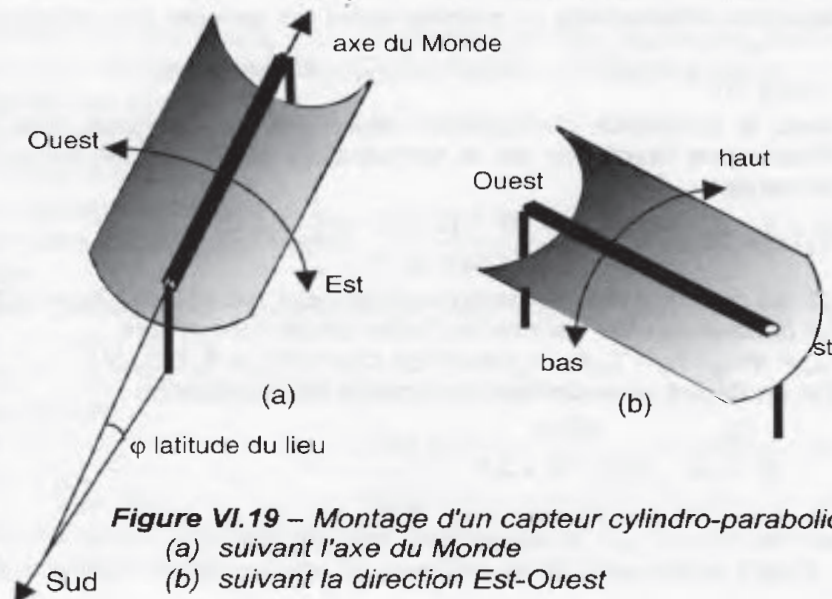


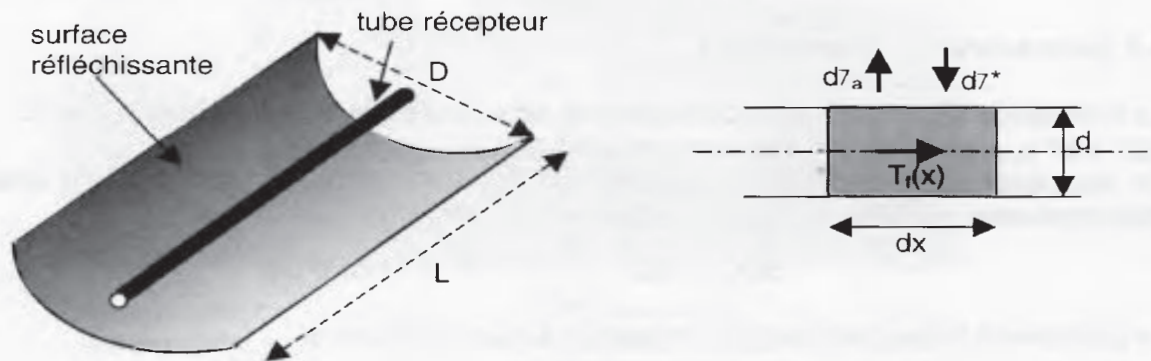
Figure VI.19 – Montage d'un capteur cylindro-parabolique
 (a) suivant l'axe du Monde
 (b) suivant la direction Est-Ouest

*** Application VI.3**

Un capteur cylindro-parabolique possède une ouverture $D=2,5$ m et une longueur $L=10$ m. La surface réfléchissante a une réflectivité solaire $\rho^*=0,86$.

Le récepteur est un tube noirci ($\alpha^*=0,94$) de diamètre $d=6$ cm. Il intercepte une fraction $\gamma=77\%$ du flux solaire réfléchi par le miroir. Le fluide caloporteur, qui y circule, entre à $T_{fe}=200^\circ\text{C}$ avec un débit $\dot{m}=500$ kg/h. Sa chaleur massique $c_p=1,26$ kJ/kg.K. Le coefficient global d'échange thermique entre le fluide et l'extérieur à $T_a=25^\circ\text{C}$ s'élève à $K=7$ W/m².K. Il est supposé constant.

Le flux solaire tombant sur l'ouverture du concentrateur vaut $S^*=700$ W/m²



Déterminons la température T_{fs} de sortie du fluide caloporteur

Soit dQ^* le flux solaire élémentaire absorbé par le fluide situé à l'intérieur d'un élément de tube de longueur dx . On a

$$dQ^* = S^* D dx \rho^* \gamma \alpha^* = 700 \times 2,5 \times 0,86 \times 0,77 \times 0,94 dx = 1089,32 dx.$$

La puissance dQ_a perdue par cet élément de fluide avec l'environnement s'écrit

$$dQ_a = K (T_f - T_a) \pi d dx = 7 (T_f - 25) \pi 0,06 dx = 1,32 (T_f - 25) dx.$$

L'équation de bilan, en régime permanent, pour un élément de longueur dx de fluide s'écrit

$$\dot{m} c_p dT_f(x) = dQ^* - dQ_a \text{ soit}$$

$$\frac{500}{3600} 1260 dT_f = [1089,32 - 1,32 (T_f - 25)] dx$$

ou encore

$$\frac{dT_f}{6,225 - 7,543 \cdot 10^{-3} (T_f - 25)} = dx$$

équation différentielle du premier ordre qui accepte pour solution

$$\frac{1}{7,543 \cdot 10^{-3}} \ln[6,225 - 7,543 \cdot 10^{-3} (T_f - 25)] = A - x$$

avec A constante d'intégration déterminée en écrivant que $T_f(x=0)=T_{fe}=200^\circ\text{C}$ $A=210,8$.

Finalement l'évolution de la température du fluide caloporteur est donnée par l'expression suivante

$$T_f(x) = 25 - \frac{\exp[7,543 \cdot 10^{-3} (210,8 - x)] - 6,225}{7,543 \cdot 10^{-3}}$$

ce qui donne la température de sortie pour $x=L=10$ m $T_{fs} = 247^\circ\text{C}$.

La puissance utile, fournie au fluide caloporteur s'écrit

$$\dot{Q}_u = \dot{m} c_p (T_{fs} - T_{fe}) = 0,139 \times 1260 (247 - 200) = 8,225 \text{ kW}.$$

On en déduit le rendement instantané de l'installation

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{S^* L D} = \frac{8225}{700 \times 10 \times 2,5} = 0,47$$

5. LES CENTRALES SOLAIRES

Les centrales solaires ou hélios thermoélectriques transforment l'énergie lumineuse en provenance du soleil dans un premier temps en énergie thermique puis dans un deuxième temps en électricité. Vouloir produire de l'électricité à partir de la voie thermodynamique oblige à satisfaire au principe de Carnot. Il sera donc nécessaire d'élever au maximum la température de la source chaude pour accroître le rendement.

5.1 Le rendement de conversion

La concentration du rayonnement solaire peut être réalisée au moyen de récepteurs cylindro-paraboliques pour des températures moyennes ou bien, pour des températures plus élevées, par un champ d'héliostats qui renvoie le rayonnement vers une chaudière placée en haut d'une tour. Le schéma de principe d'une telle centrale avec des héliostats plans est représenté à la figure ci-dessous.

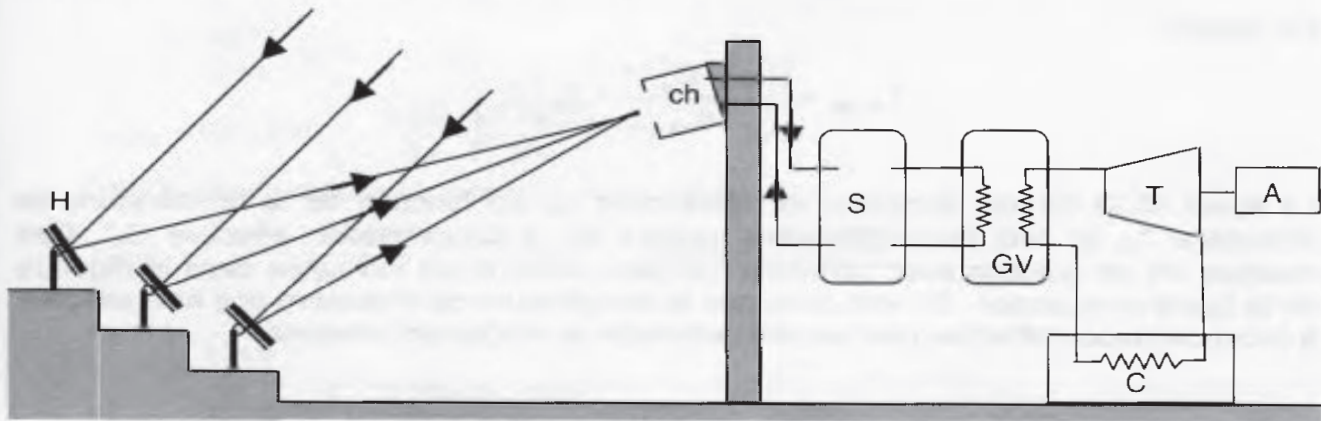


Figure VI.20 – Schéma de principe d'une centrale à tour. Un champ d'héliostats (H) fait converger le rayonnement solaire à l'entrée d'une chaudière (ch) dans laquelle circule un fluide caloporteur qui stocke l'énergie thermique dans un réservoir (S). Celui-ci alimente en énergie un générateur de vapeur (GV). La vapeur se détend dans une turbine (T) entraînant un alternateur (A), puis est envoyée vers un condenseur (C). Devenue liquide elle retourne au GV.

La puissance de la chaudière P_{ch} est égale à la puissance solaire absorbée diminuée des pertes thermiques. Exprimons les grandeurs suivantes relatives à la chaudière

- \dot{Q}_{ch}^* flux solaire moyen dans l'ouverture
- S_{ch} section de passage du rayonnement solaire
- α_{ch}^* facteur d'absorption solaire apparent
- ε_{ch} facteur d'émission infrarouge apparent
- T_{ch} température moyenne des parois intérieures
- T_a température ambiante.

Si on ne considère que les pertes par rayonnement, les parois extérieures de la chaudière étant bien isolées, on peut écrire

$$P_{ch} = \dot{Q}_{ch}^* S_{ch} \alpha_{ch}^* - \varepsilon_{ch} \sigma (T_{ch}^4 - T_a^4) S_{ch}$$

Le rendement de la chaudière s'écrit

$$\eta_{ch} = \frac{P_{ch}}{\dot{Q}_{ch}^* S_{ch}} = \alpha_{ch}^* - \frac{\varepsilon_{ch} \sigma (T_{ch}^4 - T_a^4)}{\dot{Q}_{ch}^*}$$

En notant I^* l'éclairement solaire direct tombant sur les héliostats et C_e^* la concentration effective de l'installation, le flux solaire moyen dans l'ouverture de la chaudière s'écrit

$$\dot{Q}_{ch}^* = C_e^* I^*$$

En considérant que la température au condenseur est la même que la température ambiante T_a , on peut écrire le rendement de Carnot sous la forme

$$\eta_C = 1 - \frac{T_a}{T_{ch}}$$

Finalement le rendement théorique η_{th} de la centrale électro-solaire s'écrit

$$\eta_{th} = \eta_{ch} \eta_C = \alpha_{ch}^* \left(1 - \frac{T_a}{T_{ch}} \right) \left[1 - \frac{\varepsilon_{ch} \sigma (T_{ch}^4 - T_a^4)}{\alpha_{ch}^* C_e^* I^*} \right]$$

Dans le cas où l'on tient compte de toutes les pertes thermiques, on peut écrire

$$\eta_{th} = \alpha_{ch}^* \left(1 - \frac{T_a}{T_{ch}} \right) \left[1 - \frac{K_{ch} (T_{ch} - T_a)}{\alpha_{ch}^* C_e^* I^*} \right]$$

où K_{ch} est le coefficient global de perte thermique de la chaudière.

La température optimale $T_{ch,opt}$ est donnée en écrivant $\frac{d\eta_{th}}{dT_{ch}} = 0$

On obtient

$$T_{ch,opt} = \left[\left(\frac{\alpha_{ch}^* C_e^* I^*}{K_{ch}} + T_a \right) T_a \right]^{1/2}$$

La figure VI.21 fournit l'évolution du rendement η_{th} en fonction de la température de chaudière T_{ch} et ceci pour différentes valeurs de la concentration effective C_e^* . Ces courbes ont été tracées avec certaines données numériques indiquées dans la légende de la figure en question. On voit donc que la température de chaudière doit être adaptée à la concentration effective pour espérer atteindre le rendement maximal.

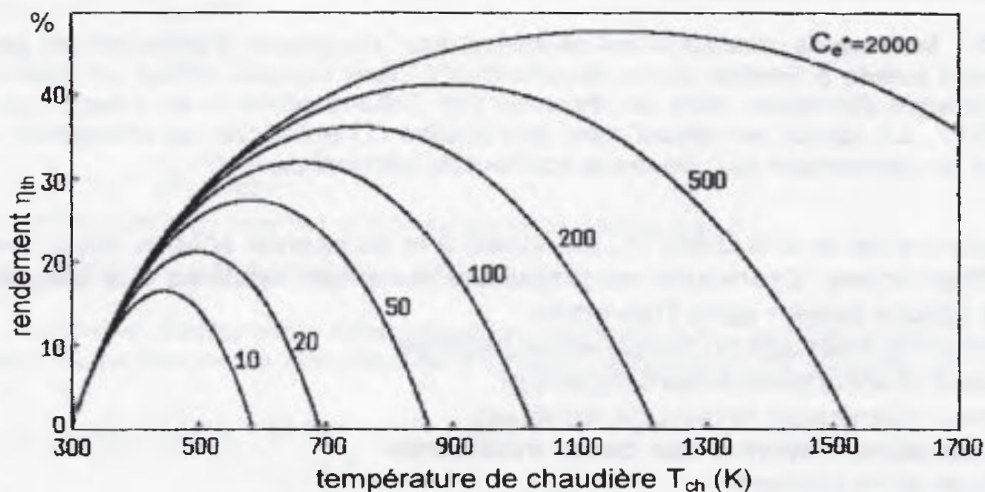


Figure VI.21 – Courbes de rendement théorique η_{th} d'une centrale en fonction de la température de chaudière T_{ch} et de la concentration énergétique effective C_e^* pour les données suivantes

- facteur d'absorption apparent de la chaudière $\alpha_{ch}^* = 0,7$
- facteur d'émission apparent de la chaudière $\varepsilon_{ch} = 0,9$
- éclairement solaire $I^* = 800 \text{ W/m}^2$
- température ambiante $T_a = 300 \text{ K}$

*** Application VI.4**

Nous allons comparer les rendements de Carnot η_c et de conversion théorique η_{th} dans le cas de deux capteurs solaires : l'un sans concentration (capteur plan), l'autre avec concentration du rayonnement solaire (capteur parabolique).

Les données météorologiques sont les suivantes

- éclairement $I^*=800 \text{ W/m}^2$
- température ambiante $T_a=30^\circ\text{C}$

Données sur le capteur plan

- rendement optique $\nu=0,8$
- coefficient global d'échange thermique $K=5 \text{ W/m}^2.\text{K}$

Données sur le capteur parabolique

- concentration effective $C_e^*=2,7$
- coefficient global d'échange thermique de la chaudière $K_{ch}=2 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- facteur d'absorption solaire apparent $\alpha_{ch}^*=0,8$.

Dans le cas du capteur plan, on peut assimiler le rendement optique à α_{ch}^* de plus la concentration C_e^* est égale à l'unité; d'où

$$T_{ch,opt} = \left[\left(\frac{0,8 \times 1 \times 800}{5} + 303 \right) 303 \right]^{1/2} = 361,4 \text{ K} = 88^\circ\text{C}$$

$$\eta_c = 1 - \frac{303}{361,4} = 0,16$$

$$\eta_{th,opt} = 0,8 \times 0,16 \left[1 - \frac{5 (361,4 - 303)}{0,8 \times 1 \times 800} \right] = 0,07$$

Dans le cas du capteur à concentration, on obtient

$$T_{ch,opt} = \left[\left(\frac{0,8 \times 2,7 \times 800}{2} + 303 \right) 303 \right]^{1/2} = 594,6 \text{ K} = 321,5^\circ\text{C}$$

$$\eta_c = 1 - \frac{303}{594,6} = 0,49$$

$$\eta_{th,opt} = 0,8 \times 0,49 \left[1 - \frac{2 (594,6 - 303)}{0,8 \times 2,7 \times 800} \right] = 0,26$$

5.2 Réalisations

Deux grands domaines sont intéressés par l'énergie solaire

- la chimie
- la production d'électricité.

La chimie solaire offre deux aspects

- la *thermochimie* pour laquelle de hautes températures sont requises.
exemples
 - four solaire de l'Institut Paul Sherrer (Suisse)
 - four solaire d'Odeillo (CNRS, Pyrénées-Orientales)
- la *photochimie* qui fait intervenir des réactions à basse température et dont l'une des voix prometteuses est la dépollution.
exemples
 - unité de synthèse photochimique du DLR (*Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt*) à Cologne (Allemagne)

- Le Ciemat (*Centro de Investigaciones Energeticas, Medioambientales y Tecnologicas*) a installé à Almeria (Espagne) une unité solaire d'épuration et de traitement de déchets.

La production d'électricité nécessite des centrales thermiques solaires à concentration. Le tableau ci-dessous répertorie les centrales d'une puissance supérieure à 500 kW.

nom	situation	puissance MW	mise en service	arrêt	type
SEGS (I à IX)	USA (Californie)	14 à 80	1984/1990		cylindro- parabolique
Solar (One, Two)		10	1982/1997		centrale à tour
Solar Plant		5	1984		parabolique
SES 5	Ukraine, Crimée	5	1985	centre d'essais	centrales à tour
Themis	France (Targassonne)	2.5	1983	1986	
CESA 1	Espagne (Almeria)	1	1983	centre d'essais	
Eurelios	Italie (Sicile)	1	1981	1986	
NIO	Japon (Shikoku)	1	1981	1986	
SSPS-CRS	Espagne (Almeria)	0.5	1981	centre d'essais	
SSPS-DCS		0.5	1981	centre d'essais	cylindro- parabolique

Tableau VI.1 – Centrales solaires d'une puissance supérieure à 500 kW.



Figure VI.22 – Centrale Thémis en 1983. Arrêtée en 1986, c'était une centrale à tour et héliostats plans.

CHAPITRE VII

LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Transformant directement l'énergie rayonnée par le soleil en énergie électrique, les photopiles ne nécessitent pas une installation thermique lourde et compliquée et présentent donc un intérêt économique certain. Néanmoins le rendement atteint par cette technique de transformation de l'énergie solaire en électricité est du même ordre que celui obtenu avec la filière thermodynamique. Toutefois l'absence de pièces mobiles est un gage de fiabilité. C'est d'ailleurs l'une des raisons pour lesquelles l'industrie spatiale s'est emparé de ce moyen de production d'électricité et a développé cette technique. Seul le coût actuel des photopiles freine le développement à grande échelle de la filière PV (photovoltaïque).

1. L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

1.1 Introduction

En 1839, Antoine Becquerel¹ obtient une différence de potentiel aux bornes d'une électrode éclairée immergée dans un électrolyte. En 1954, les *Bell Telephone Laboratories* fabriquent la première pile solaire d'un rendement de 6 %. Vient alors la conquête spatiale qui, avec ses satellites artificiels, demande de plus en plus d'énergie électrique. En 1959, le premier satellite artificiel équipé de photopiles est lancé. Il s'agit du satellite *Vanguard* mis en orbite par la NASA.

Le matériau de base utilisé actuellement est le silicium. Celui-ci se trouve en très grande quantité sur notre planète puisqu'il constitue environ 28 % de l'écorce terrestre. En fait on le trouve surtout sous forme de dioxyde de silicium (SiO_2) qui est le constituant principal du sable. Il est donc très abondant et peu coûteux. Quelques unes de ses propriétés sont données au tableau ci-dessous.

symbole	propriété	valeur
Si	nombre atomique	14
	masse atomique	28,086
	masse volumique	2330 kg/m ³
	température de fusion	1683 K
	température d'ébullition	2628 K
	coefficient de dilatation thermique	4,2.10 ⁻⁶ /K

Tableau VII.1 – Caractéristiques du silicium.

¹ Ne pas confondre avec Henri Becquerel qui découvrit la radioactivité en 1896. Henri est le petit-fils d'Antoine.

Cependant, pour être utilisable en électronique, le silicium doit être très pur. Il suffit d'un atome d'impureté sur un million pour multiplier les porteurs de charge par dix millions. Cette pureté coûte très cher à obtenir.

Il existe plusieurs types de cellules en fonction de la structure microscopique du silicium.

- *silicium monocristallin* : c'est celui qui se rapproche le plus du modèle théorique décrit dans la suite. Son rendement est de l'ordre de 15 %. Mais il est aussi le plus difficile à obtenir. Après réduction de l'oxyde au four électrique, on obtient du silicium pur à 98 % ce qui n'est pas suffisant pour réaliser des cellules photovoltaïques. Une seconde opération de purification est nécessaire d'où son prix élevé.
- *silicium polycristallin* : il est obtenu par coulage de cristaux de silicium ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est plus faible que pour le silicium monocristallin de l'ordre de 10 %.
- *silicium amorphe* ou en couche mince : les cristaux de silicium sont déposés en mince couche sur un substrat le plus souvent du verre ou un matériau synthétique. Il est en général utilisé pour des appareils de faibles puissances (montre, calculatrice...). Le rendement se situe aux alentours de 7 %.

On trouve aussi certaines cellules qui utilisent d'autres matériaux.

- GaAs : arséniure de gallium. Matériau monocristallin, qui fournit des cellules en couches minces ayant un très bon rendement mais dont le prix les destine au domaine spatial.
- CdTe : tellure de cadmium. Matériau polycristallin déposé sur un substrat en verre.
- CIS : diséléniure de cuivre et d'indium. Ce matériau donne des photopiles très stables dans le temps.
- TiO_2 : dioxyde de titane. Cette technologie en est au stade expérimental.

1.2 Principe

Une photopile est constituée d'un matériau absorbant l'énergie des photons et la transformant en énergie électrique.

Dans le schéma simple d'un matériau à deux niveaux d'énergie (cf. fig. VII.1), un électron possédant l'énergie E_1 appartient à la *bande de valence* et se trouve lié à l'atome. S'il reçoit une énergie (sous la forme d'un photon par exemple) qui lui permet d'atteindre le niveau E_2 , énergie correspondant à la *bande de conduction*, il devient libre et peut alors participer à un courant électrique. Cette énergie, nécessaire pour que l'électron devienne libre, est notée E_g . On la donne le plus souvent en électron-volt (eV). On a bien sûr

$$E_g = E_2 - E_1.$$

On appelle *largeur de bande interdite* cet écart énergétique entre la bande de valence et la bande de conduction. La tension de sortie du générateur élémentaire est donnée par E_g/q où q est la charge de l'électron.

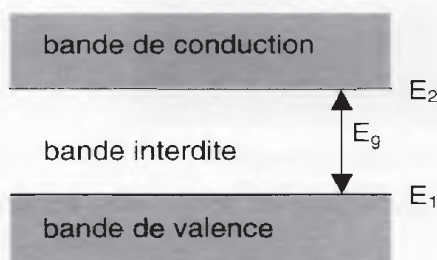


Figure VII.1 – Schéma caractérisant les trois bandes dans un matériau semi-conducteur.

Si on choisit un matériau ayant une largeur de bande interdite étroite, cela favorisera le déplacement des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction mais alors la tension aux bornes de la cellule élémentaire sera faible. C'est le cas des métaux. Si par contre on choisit un matériau ayant une largeur de bande interdite élevée, les électrons auront du mal à se libérer de la bande de valence et aucun courant n'apparaîtra. C'est le cas des isolants électriques ($E_g > 5$ eV). Le cas des semi-conducteurs est un compromis qui permet d'obtenir un courant sous une tension acceptable.

Le tableau VII.2 donne la valeur de E_g pour quelques matériaux semi-conducteurs.

matériau	E_g eV
germanium Ge	0,67
silicium Si	1,11
arséniure de gallium GaAs	1,35
sulfure de cadmium CdS	2,40

Tableau VII.2 – Valeurs de la bande interdite pour différents semi-conducteurs

Mais pour qu'un électron libéré par l'absorption d'un photon participe à un courant utile, faut-il encore le *canaliser*, le collecter; c'est le rôle de la dissymétrie électrique que l'on obtient par création d'une jonction entre deux semi-conducteurs dopés différemment. Ainsi du silicium tétravalent dopé par du phosphore pentavalent fournit un matériau du type N dans lequel des électrons restent libres. Ce même silicium dopé avec du bore trivalent donnera un matériau de type P dans lequel apparaîtra une lacune d'électrons. Le contact entre ces deux types de silicium fournit une jonction où règne un champ électrique \vec{E} qui oriente sélectivement les porteurs positifs et négatifs. Ceux-ci donnent alors naissance à un courant.

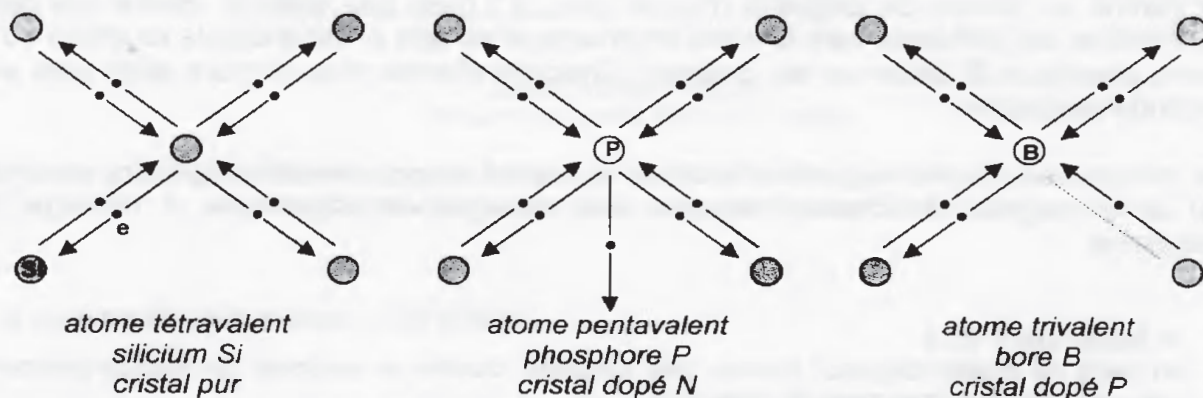


Figure VII.2 – Schéma de trois atomes de silicium dopés différemment.

Un photon, de longueur d'onde λ , possède une énergie E_λ telle que

$$E_\lambda = \frac{h c}{\lambda}$$

avec h constante de Planck ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s)
 c vitesse de la lumière ($c = 299\,792\,458$ m/s).

Si cette énergie est inférieure à l'énergie E_g de la bande interdite, il ne produira pas de paire électron-trou. On peut donc définir une *longueur d'onde de coupure* λ_c donnée par l'égalité suivante

$$\lambda_c = \frac{h c}{E_g}$$

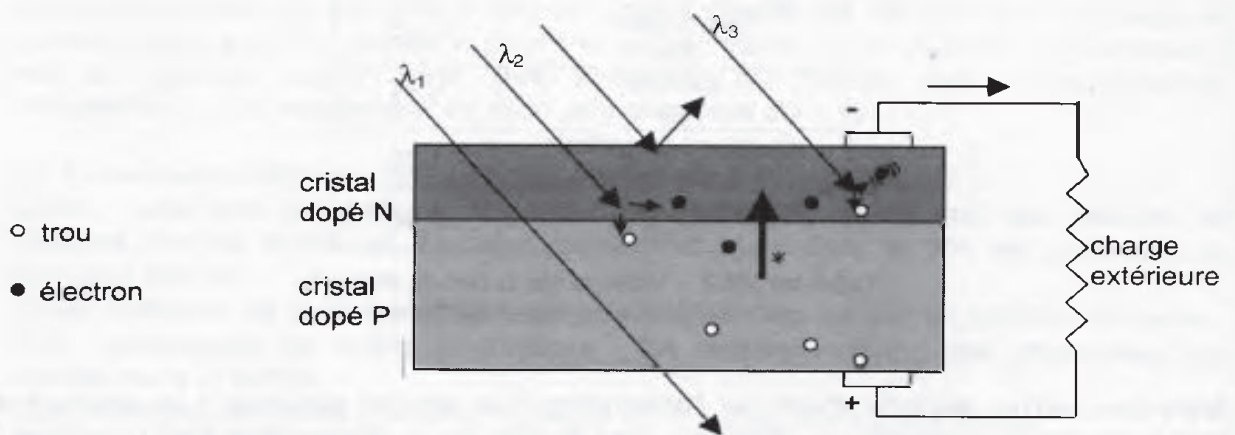


Figure VII.3 – Schéma de principe d'une photopile.

Les photons dont la longueur d'onde λ_2 est égale à la longueur d'onde de coupure λ_c créent une paire électron-trou. Les photons de grande longueur d'onde $\lambda_1 > \lambda_c$ traversent la photopile sans effet photovoltaïque tandis que les photons de courte longueur d'onde $\lambda_3 < \lambda_c$ créent une paire électron-trou, le surplus d'énergie étant transformé en chaleur.

Un photon de longueur d'onde $\lambda_1 > \lambda_c$ ne créera pas de paire électron-trou.

Par contre, un photon de longueur d'onde $\lambda_2 = \lambda_c$, s'il n'est pas réfléchi, créera une paire électron-trou qui diffusera vers la zone de charge d'espace (c'est-à-dire la jonction) où le champ électrique \vec{E} séparera les charges. Chacune d'entre elles migrera alors vers son électrode respective.

Les photons de courte longueur d'onde $\lambda_3 < \lambda_c$, quant à eux, créeront une paire électron-trou accompagnée de chaleur puisque leur énergie est supérieure à l'énergie E_g nécessaire.

* Application VII.1

En deçà de quelle longueur d'onde, dite longueur d'onde de coupure, un photon créera-t-il une paire électron-trou dans du silicium ?

Sachant que la bande interdite vaut $E_g = 1,11$ eV pour le silicium, la longueur d'onde de coupure vaut

$$\lambda_c = \frac{h c}{E_g} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8}{1,11 \times 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,12 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 1,12 \text{ } \mu\text{m}$$

Cette longueur d'onde se trouve dans le proche infrarouge. Les parties visibles et ultraviolettes du spectre solaire participent à la création d'un photocourant, ce qui n'est pas le cas de la plus grande partie de l'IR.

1.3 Rendement de la photopile idéale

On suppose que tout photon intercepté par la photopile donne lieu à la création d'un électron qui est ensuite collecté. Les photons d'énergie trop faible ($\lambda > \lambda_c$) traversent la photopile et ne sont donc pas pris en compte.

Le flux de photons incidents pour une bande $d\lambda$ du spectre solaire est donné par

$$dN(\lambda) = \frac{M_\lambda}{E_\lambda} d\lambda$$

où M_λ est l'émittance du soleil pour la longueur d'onde λ et E_λ l'énergie des photons correspondant à cette même longueur d'onde. Tant que E_λ est supérieur à E_g chaque photon donne naissance à un électron.

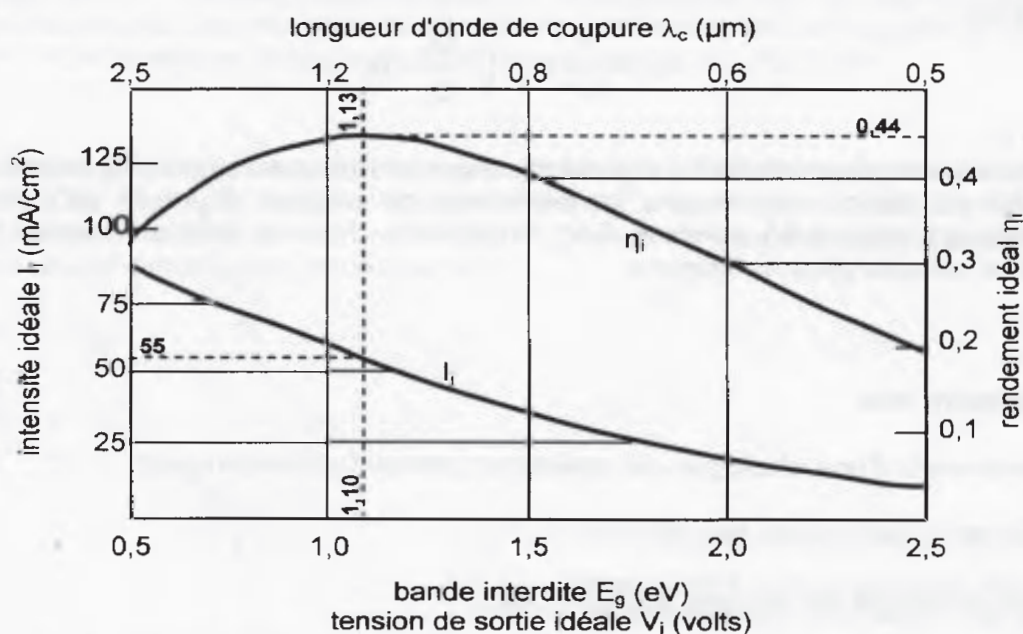


Figure VII.4 – Intensité idéale I_i et rendement idéal η_i en fonction de la longueur d'onde de coupure λ_c ou de la bande interdite $E_g = h.c/\lambda_c$.

Le courant théorique ainsi créé s'écrit

$$I_i = q \int_0^{\lambda_c} dN(\lambda)$$

où, comme on l'a vu, q est la charge de l'électron.

La figure VII.4 donne la valeur du *courant idéal* I_i (en mA/cm²) que délivrerait une photopile idéale élémentaire placée à la limite de l'atmosphère terrestre (AM0) perpendiculairement aux rayons solaires.

En abscisse est portée la valeur de E_g (en eV). Choisir un matériau pour lequel la bande interdite E_g est élevée diminue la probabilité qu'un photon crée une paire électron-trou. De plus la longueur d'onde de coupure λ_c est plus faible ce qui diminue la plage utile du spectre solaire. Le courant idéal délivré I_i diminue alors d'autant.

Le rendement idéal est obtenu en écrivant

$$\eta_i = \frac{P_i}{C^*}$$

où P_i représente la puissance de la photopile et C^* la constante solaire (dans le cas de AM0). La puissance est donnée par

$$P_i = V_i I_i$$

avec $V_i = \frac{E_g}{q}$ tension de sortie idéale.

En faisant varier E_g , ce rendement passe par un maximum comme indiqué à la figure VII.4. En effet

$$\eta_i = \frac{1}{C^*} E_g \int_0^{\lambda_c} \frac{M_\lambda}{E_\lambda} d\lambda$$

pour $E_\lambda > E_g$.

Le maximum de rendement (44%) est obtenu avec un matériau ayant une bande interdite E_g de 1,10 eV, ce qui correspond sensiblement au silicium ($E_g=1,11$ eV), le courant obtenu s'élevant alors à 55 mA/cm². Ceci explique le choix du silicium comme matériau de base des cellules photovoltaïques.

1.4 Rendement réel

Le rendement d'une photopile est altéré par différents phénomènes :

- L'absorption incomplète des photons ($\lambda_1 > \lambda_c$)
- L'excès d'énergie de certains autres ($\lambda_2 < \lambda_c$).

Ces deux phénomènes apparaissent à la figure VII.5 tracée pour une photopile au silicium ($E_g=1,11$ eV, $\lambda_c=1,12$ μm).

- La réflexion à la surface de la photopile elle peut être atténuée par un traitement de surface (couche anti-reflet, surface texturée).
- Le collectage incomplet des porteurs certains porteurs peuvent disparaître durant leur migration par recombinaison en paires électron-trou; ce phénomène dépend beaucoup des caractéristiques du matériau (épaisseur, dislocations, impuretés,...). Il est mesuré par le *facteur de collecte*. Le courant photonique I_ϕ qui circule est donc inférieur au courant idéal I_i .

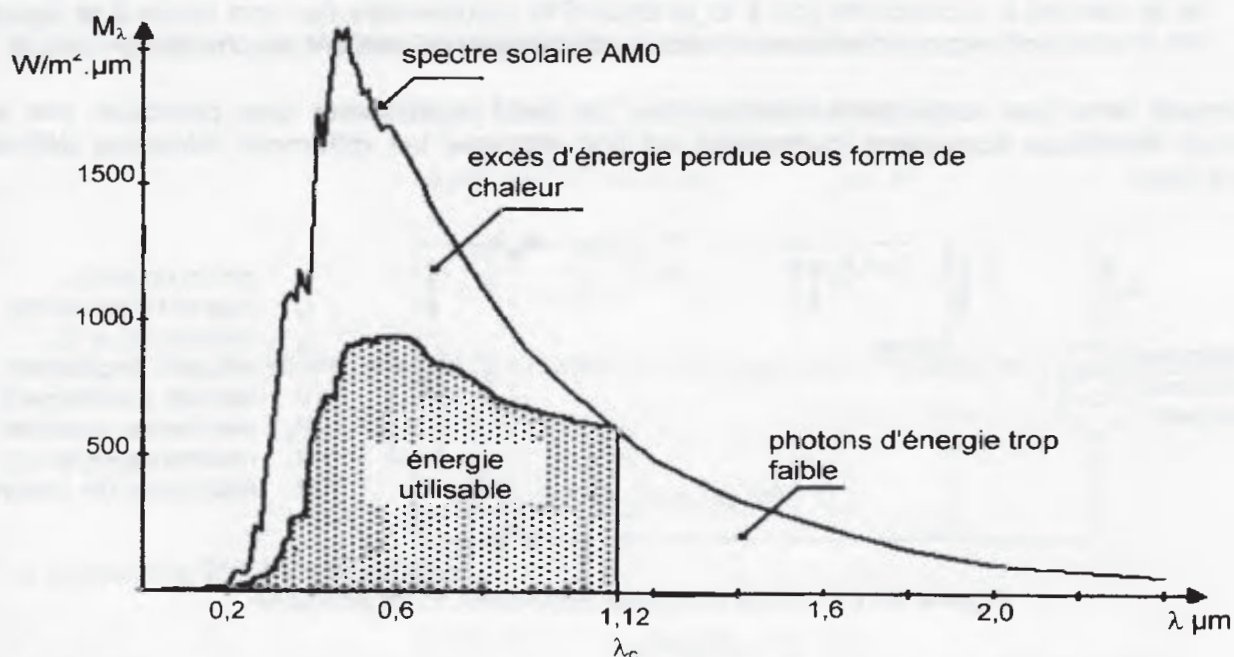


Figure VII.5 – La surface grisée correspond à l'énergie utilisable pour créer des paires électron-trou pour une photopile au silicium située à la limite de l'atmosphère terrestre (AM0). Pour le silicium, la longueur d'onde de coupure vaut $\lambda_c = 1,12 \mu\text{m}$.

- Le *facteur de tension* qui tient compte de la tension réellement mesurée lorsqu'un électron de charge q saute la bande interdite E_g . La tension idéale de sortie s'écrit $V_i = E_g/q$ tandis que la tension maximale V_{∞} , mesurée aux bornes de la photopile en circuit ouvert est toujours inférieure à V_i .

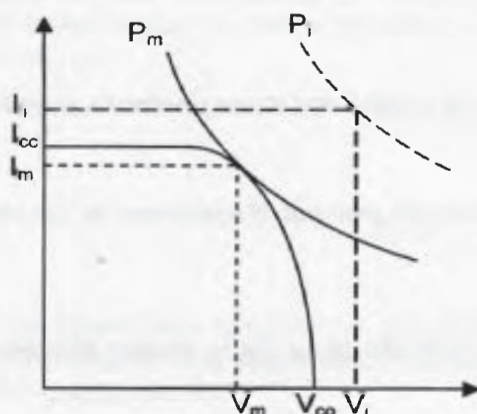


Figure VII.6 – Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

- Le matériau semi-conducteur présente une *résistance série*, notée R_s , le plus souvent inférieure à 1Ω . Notons qu'une autre résistance bien supérieure à R_s , dite *résistance parallèle* et notée R_p , provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur les bords de la photopile.
- Le *facteur de courbe* la caractéristique courant-tension d'une photopile n'est pas rectangulaire. Pour un éclairement S^* , une température T et une surface S_c donnés, la photopile fournit un courant I_{cc} en court-circuit et une tension V_{∞} en circuit ouvert. Si elle débite sur une résistance de charge R , la tension V aux bornes n'est plus nulle

et le courant I_d d'obscurité (dû à la jonction PN représentée par une diode à la figure VII.7) s'accroît exponentiellement, réduisant d'autant le courant de charge I .

Compte tenu des remarques précédentes, on peut représenter une photopile par le circuit électrique équivalent ci-dessous où l'on retrouve les différents éléments définis plus haut.

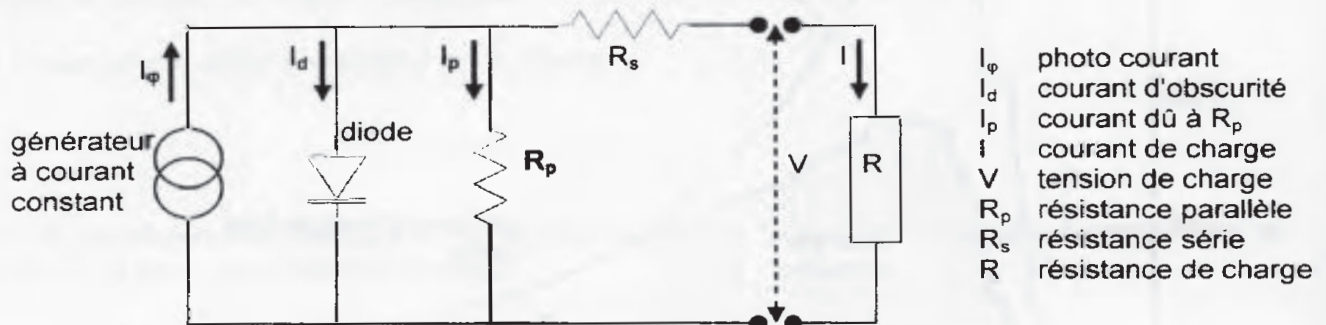


Figure VII.7 – Circuit électrique équivalent d'une photopile.

L'influence relative sur le rendement de la photopile de chacun des facteurs étudiés plus haut est résumée à la figure VII.8 dans le cas d'une photopile au silicium.

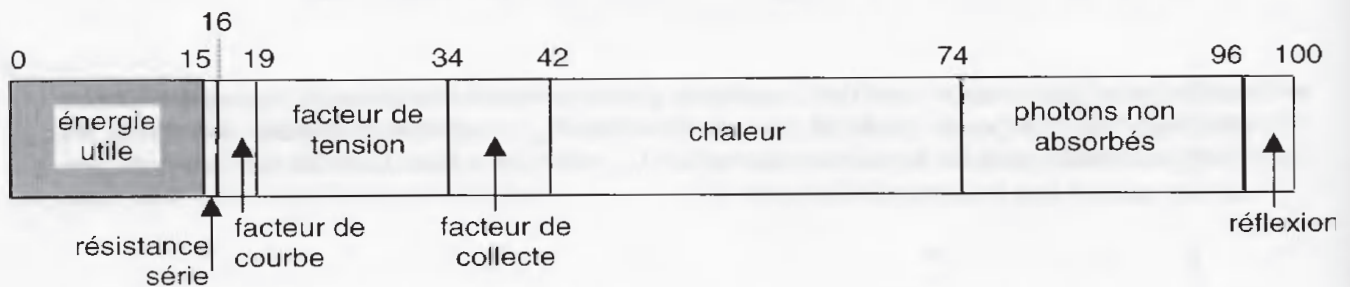


Figure VII.8 – Influence des différentes pertes sur le rendement d'une photopile au silicium.

L'étude de la physique d'une cellule photovoltaïque permet d'exprimer le courant de charge I par l'équation suivante

$$I = I_\phi - I_d$$

dans la mesure où l'on peut négliger le courant I_p compte tenu de la valeur élevée de la résistance parallèle R_p .

Le photocourant I_ϕ est proportionnel à l'éclairement direct S^* tombant sur la cellule. Soit a_1 le coefficient de proportionnalité.

On a

$$I_\phi = a_1 S^*$$

Le courant d'obscurité, quant à lui, est de la forme

$$I_d = a_2 [\exp(a_3 V) - 1].$$

Dans ces expressions, les paramètres a_1 , a_2 et a_3 sont fonctions de la température T de fonctionnement de la cellule.

Ils peuvent être calculés par les expressions suivantes

$$a_1 = 2,5 \cdot 10^{-7} T + 2 \cdot 10^{-4} \quad [\text{en A/(W/m}^2\text{)}]$$

$$a_2 = 4 \cdot 10^{-6} T^4 \exp(-a_3) \quad [\text{en A}]$$

$$a_3 = \frac{q}{k \cdot T} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} T} \quad [\text{en A/W}]$$

avec T en degrés kelvin, q étant la charge de l'électron (en coulomb) et k la constante de Boltzmann (en J/K).

On a donc

$$I = a_1 S^* - a_2 [\exp(a_3 \cdot V) - 1]$$

La puissance $P = I \cdot V$ s'écrit alors

$$P = a_1 S^* V - a_2 [\exp(a_3 \cdot V) - 1] V$$

En dérivant cette expression du courant en fonction de la tension V , et en écrivant que cette dérivée est nulle, on obtient une expression donnant la tension V_m qui correspond au maximum de puissance possible

$$\exp(a_3 \cdot V_m) (1 + a_3 \cdot V_m) = 1 + \frac{a_1 \cdot S^*}{a_2}$$

La valeur de V_m étant obtenue en résolvant l'équation par une méthode numérique (dichotomie par exemple), on l'injecte dans l'expression du courant I ce qui permet d'obtenir le courant I_m correspondant à la puissance maximum P_m .
Écrivons que

$$\exp(a_3 \cdot V_m) = \frac{a_2 + a_1 \cdot S^*}{a_2 (1 + a_3 \cdot V_m)}$$

d'où,

$$I_m = \frac{a_3 \cdot V_m}{1 + a_3 \cdot V_m} (a_1 \cdot S^* + a_2)$$

Pour les photopiles habituelles, on a généralement $a_2 \ll a_1 \cdot S^*$

On obtient donc une expression de la puissance maximale $P_m = I_m \cdot V_m$ en fonction de la tension maximale V_m

$$P_m = \frac{a_1 \cdot a_3 \cdot S^* V_m^2}{1 + a_3 \cdot V_m}$$

Le rendement maximal η_m est alors obtenu en écrivant

$$\eta_m = \frac{P_m}{P^*} = \frac{a_1 \cdot a_3 \cdot V_m^2}{(1 + a_3 \cdot V_m) S_c}$$

avec $P^* = S^* \cdot S_c$ correspond à la puissance solaire (en watts) tombant sur la cellule.

On appelle *facteur de courbe* (ou *de forme*), noté FF, le rapports suivant

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} V_{\infty}}$$

où I_{cc} est le courant de court-circuit et V_{∞} est la tension en circuit ouvert.

* Application VII.2

Déterminons le rendement maximum η_m d'une photopile ayant les caractéristiques suivantes

- diamètre $d=54$ mm
- éclairement solaire $S^*=700$ W/m²
- température de fonctionnement $T=300$ K.

La surface de la photopile vaut

$$S_c = \pi d^2/4 = \pi 0,054^2/4 = 2,29 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

d'où une puissance solaire

$$P^* = S^* \cdot S_c = 700 \times 2,29 \cdot 10^{-3} = 1,603 \text{ W}$$

On obtient les valeurs suivantes pour les trois paramètres a_1 , a_2 et a_3

$$a_1 = 2,75 \cdot 10^{-4}$$

$$a_3 = 38,65$$

$$a_2 = 5,3 \cdot 10^{-13}$$

La solution de l'équation non linéaire $\exp(38,65 \times V_m)(1 + 38,65 \times V_m) = 1 + \frac{2,75 \cdot 10^{-4} \times 700}{5,3 \cdot 10^{-13}}$

donne $V_m = 0,606$ volt.

Le courant correspondant s'écrit

$$I_m = \frac{38,65 \times 0,606}{1 + 38,65 \times 0,606} (2,75 \cdot 10^{-4} \times 700 + 5,3 \cdot 10^{-13}) = 185 \text{ mA}$$

et la puissance maximale

$$P_m = 0,606 \times 0,185 = 112 \text{ mW.}$$

On en déduit le rendement $\eta_m = \frac{P_m}{P^*} = \frac{I_m \cdot V_m}{S^* \cdot S_c} = \frac{0,112}{1,603} = 7\%$

La résistance de charge doit être égale à $R_m = \frac{V_m}{I_m} = \frac{0,606}{0,185} = 3,26 \Omega$

1.5 Influence de la résistance de charge

À partir de la caractéristique d'une photopile (cf. fig.VII.9), on définit le point de fonctionnement comme l'intersection de cette courbe avec la droite de charge de pente $1/R$.

Une cellule photovoltaïque n'impose ni un courant ni une tension mais un couple (I, V) déterminé par la résistance de charge. Si celle-ci est petite (cas R'), le point de fonctionnement se trouvera dans la partie AB de la courbe pour laquelle la cellule se comporte comme un générateur à courant pratiquement constant tandis que pour une grande résistance (cas R''), ce point se trouvera dans la partie CD où la cellule se comporte comme un générateur de tension pratiquement constante.

La puissance maximale $P_m = I_m \cdot V_m$ sera obtenue pour une impédance R_m . Le point M caractérise le plus grand rectangle inscriptible sous la caractéristique de la photopile.

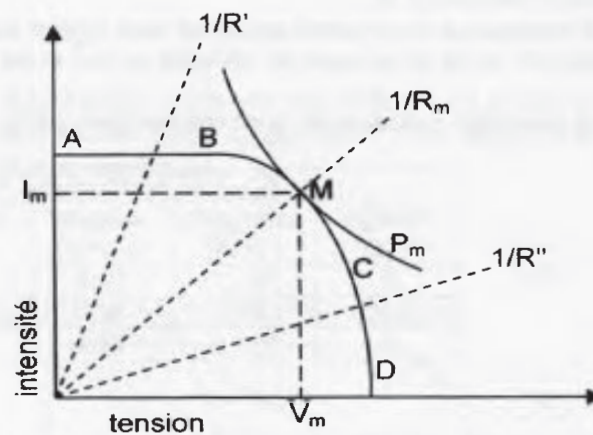
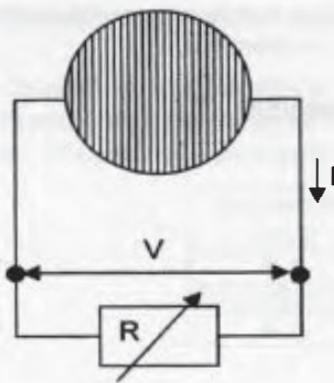


Figure VII.9 – Influence de la résistance de charge sur l'intensité et la tension fournies par une cellule photovoltaïque.

Au point M, l'hyperbole

$$I = \frac{P_m}{V}$$

a pour dérivée

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_M = - \left. \frac{P_m}{V^2} \right|_M = - \frac{I_m \cdot V_m}{V_m^2} = - \frac{I_m}{V_m}$$

et comme $V_m = R_m \cdot I_m$,

au point M de fonctionnement optimal on a

$$\left| \frac{dI}{dV} \right| = \frac{1}{R_m}$$

* Application VII.3

Cherchons l'influence que peut avoir la modification de la charge aux bornes de la photopile étudiée à l'application VII.2.

On considère toujours une température de fonctionnement de 300 K, ce qui fait que les coefficients a_i sont inchangés.

• Considérons tout d'abord une impédance $R < R_m = 3,26 \, \Omega$. Soit donc $R = 2 \, \Omega$.

On a $V = R \cdot I = 2 I$.

En remplaçant V par cette valeur dans l'expression donnant l'intensité I , on obtient une équation non linéaire à une inconnue.

$$I = a_1 S^* - a_2 [\exp(a_3 \cdot V) - 1] = 2,75 \cdot 10^{-4} \times 700 - 5,3 \cdot 10^{-13} [\exp(38,65 \times 2 I) - 1]$$

dont la solution, obtenue par dichotomie, vaut $I = 192,5 \, \text{mA}$.

On en déduit la tension V

$$V = R \cdot I = 2 \times 192,5 = 385 \, \text{mV}$$

et par suite, la puissance P

$$P = V \cdot I = 0,385 \times 0,1925 = 74 \, \text{mW}.$$

Le rendement $\eta = 0,074 / 1,603 = 4,6 \, \%$.

Une résistance trop grande entraîne une diminution de la tension, une légère augmentation du courant et une baisse sensible de la puissance et donc du rendement.

• Soit à présent $R = 5 \, \Omega$.

On a $V = 5 I$.

La résolution de l'expression en I donne $I = 131,8 \, \text{mA}$,

$$\text{d'où } V = 5 I = 5 \times 131,8 = 659 \, \text{mV},$$

$$P = 0,1318 \times 0,659 = 87 \, \text{mW}$$

et $\eta = 87/1603 = 5,4 \%$.

Une résistance trop petite entraîne une légère augmentation de la tension, une diminution de l'intensité et de la puissance délivrée et par suite une baisse du rendement.

- Les résultats précédents sont rassemblés dans le tableau ci-dessous

$S^* = 700 \text{ W/m}^2$, $d = 54 \text{ mm}$, $T = 300\text{K}$				
charge $R (\Omega)$	intensité $I (\text{mA})$	tension $V (\text{mV})$	puissance $P (\text{mW})$	rendement $\eta (\%)$
2	192,5	385	74	4,6
3,26	185	606	112	7
5	131,8	659	87	5,4

1.6 Influence de l'éclairement

Lorsque l'éclairement S^* varie, ce qui est inévitable le long d'une journée ensoleillée, la caractéristique d'une cellule photovoltaïque évolue. Il y a proportionnalité entre le photocourant et le flux lumineux tombant sur la cellule.

Pour extraire le maximum d'énergie électrique, il faut adapter l'impédance de charge.

La figure VII.10 montre comment doit évoluer la résistance de charge en fonction de l'éclairement pour extraire le maximum de puissance.

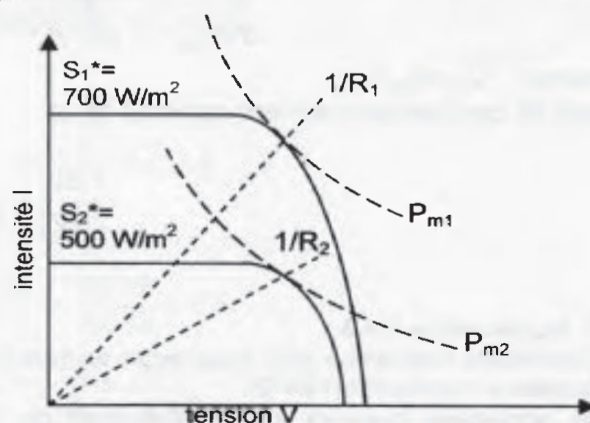


Figure VII.10 – Influence de l'éclairement sur les performances d'une cellule photovoltaïque.

* Application VII.4

Déterminons l'influence sur le rendement maximum η_m de la baisse de l'éclairement S^* , dans le cas de la cellule étudiée à l'application VII.2, toutes choses étant égales par ailleurs.

Soit $S^* = 500 \text{ W/m}^2$

Les paramètres a_1 , a_2 et a_3 ne changent pas.

Par contre on doit recalculer V_m qui devient $V_m = 598 \text{ mV}$

On en déduit $I_m = 132 \text{ mA}$

et par suite $P_m = 79 \text{ mW}$

et $\eta_m = 0,079 / (500 \times 2,29 \cdot 10^{-3}) = 6,9 \%$.

La baisse de l'éclairement n'entraîne pas une diminution sensible du rendement maximum à condition que la résistance de charge soit adaptée aux nouvelles conditions. Elle devient dans notre cas

$$R_m = \frac{0,598}{0,132} = 4,53 \Omega \quad \text{Il faut augmenter la résistance de charge.}$$

1.7 Influence de la température

Quand la température de la cellule augmente, il en est de même du photocourant I_{ph} (E_g diminuant) mais également du courant d'obscurité I_d qui croît très vite, faisant ainsi chuter la tension comme le montre la figure ci-dessous.

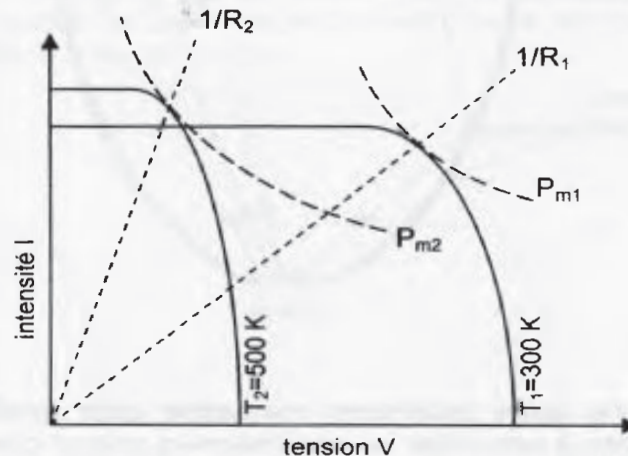


Figure VII.11 – Influence de la température sur les performances d'une cellule photovoltaïque.

Pour améliorer les performances de l'installation il faut adapter la résistance de charge et surtout chercher à refroidir les cellules photovoltaïques.

* Application VII.5

Étudions l'influence du changement de la température de fonctionnement, toutes choses étant égales par ailleurs, dans le cas de la cellule étudiée à l'application VII.2.

Soit $T=500$ K

On obtient les résultats suivants

$$a_1 = 3,25 \cdot 10^{-4}$$

$$a_3 = 23,188$$

$$a_2 = 2,125 \cdot 10^{-5}$$

d'où l'on déduit $V_m = 309,5$ mV $I_m = 227,5$ mA

et par suite $P_m = 70$ mW

et $\eta_m = 0,07 / (700 \times 2,29 \cdot 10^{-3}) = 4,4$ %.

On en déduit la résistance de charge

$$R_m = \frac{0,3095}{0,2275} = 1,36 \, \Omega$$

L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension V_m , un léger accroissement du courant I_m et par suite une baisse de la puissance P_m et du rendement maximum η_m . Il faut diminuer la résistance de charge pour se trouver toujours au maximum de rendement.

1.8 Les améliorations possibles

Le coût des photopiles étant élevé, on a envisagé d'accroître le flux solaire incident sans augmenter la surface des cellules et ce, grâce à un système concentrant le rayonnement solaire.

La technologie étudiée en France dans les années 80 (LAAS, CNES - concentrateur *Sophocle*) utilisait des lentilles de Fresnel avec une concentration de 40. Des parois réfléchissantes renvoyaient le rayonnement vers la cellule. Cette technologie assez

lourde à mettre en œuvre (il faut un système d'orientation et de suivi du soleil) n'a pas donné lieu à développement industriel.

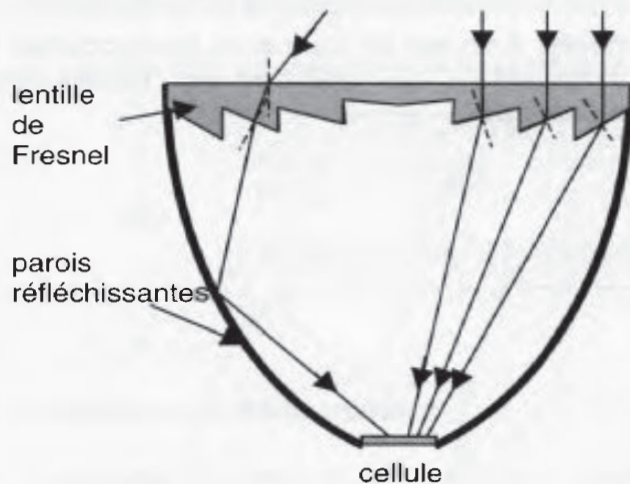


Figure VII.12 – Système à concentration par lentille de Fresnel.

Une autre technique envisagée pour améliorer le rendement des systèmes PV consiste à présenter au rayonnement solaire plusieurs cellules possédant des longueurs d'onde de coupure différentes. Chaque cellule est optimisée pour une bande spectrale donnée, ce qui a valu à cette technique le nom de *photopiles multicolores*. Dans le cas, par exemple, de deux photopiles en tandem, les photons ayant une longueur d'onde supérieure à la longueur d'onde de coupure de la première cellule, vont traverser cette dernière et rencontrent alors la seconde photopile qui possède une longueur d'onde de coupure telle qu'ils puissent créer une paire électron-trou. On peut alors imaginer, sur ce principe, une combinaison de photopiles sensibles aux différentes plages du spectre solaire et transformer ainsi le maximum de rayonnement solaire en électricité.

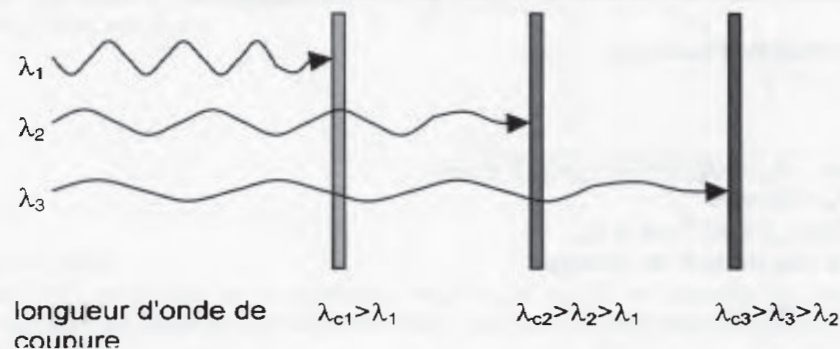


Figure VII.13 – Principe de cellules en tandem permettant d'optimiser la captation du rayonnement solaire.

On trouve aussi sur le marché PV des modules SST (*Spherical Solar™ Technology*) réalisés par dépôt sur un substrat en aluminium de petites sphères de silicium. L'avantage premier de ces modules est leur flexibilité. Les utilisations potentielles sont nombreuses comme par exemple dans le bâtiment pour la fabrication de parois ou de tuiles solaires. Cependant si les coûts de fabrication sont plus faibles, le rendement est lui aussi plus faible (11 %).

2. UTILISATIONS

2.1 Montage série

La tension délivrée par une cellule photovoltaïque est toujours très faible. La figure VII.14 montre trois cellules identiques montées en série et permettant d'avoir une tension trois fois plus grande aux bornes de la résistance de charge.

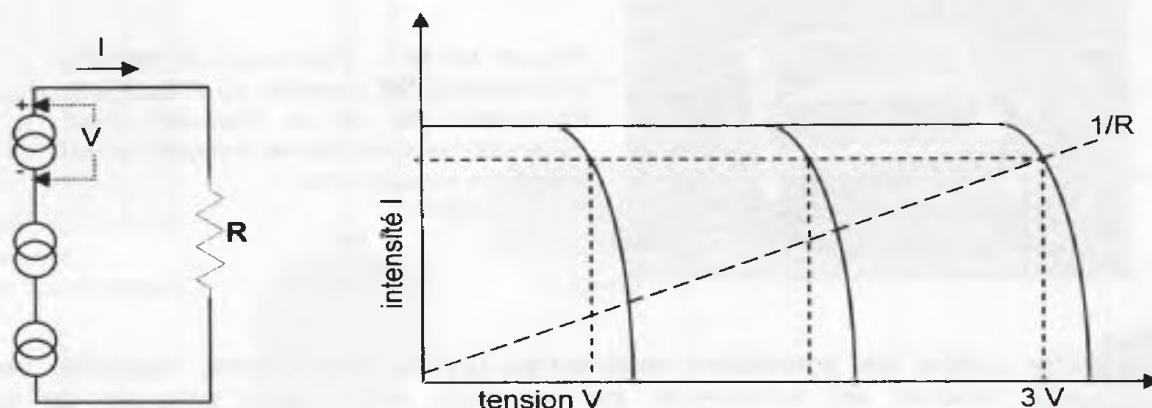


Figure VII.14 – Montage en série de cellules photovoltaïques permettant d'accroître la tension délivrée.

2.2 Montage parallèle

Pour accroître le courant il suffit de placer en parallèle un certain nombre de cellules élémentaires. La figure VII.15 montre un module photovoltaïque composé de trois cellules montées en parallèle; le courant qui passe dans la résistance de charge est trois fois celui qui circule dans chacune des cellules identiques.

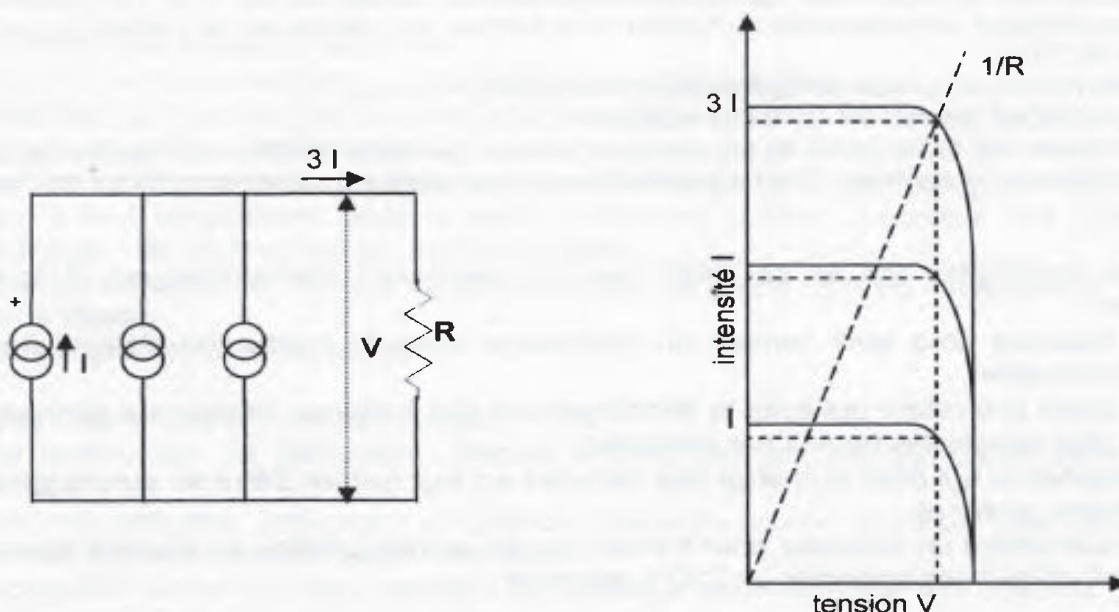


Figure VII.15 – Montage en parallèle de cellules photovoltaïques permettant d'accroître le courant délivré.

2.3 Mise en œuvre

Dans la pratique les panneaux photovoltaïques regroupent généralement des cellules élémentaires en série et en parallèle afin d'obtenir suffisamment de courant sous une tension acceptable. La puissance indiquée pour un tel panneau est donnée en Wc (watts-crête) pour un éclairement de 1000 W/m^2 avec une répartition spectrale correspondant à AM 1,5 et une température de 25°C (Conditions d'Essai Standard).

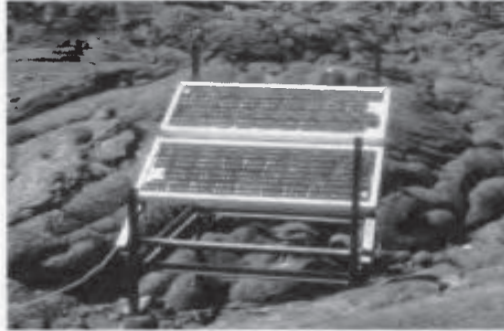


Figure VII.16 – Panneaux de cellules photovoltaïques installés au Piton de la Fournaise (île de la Réunion) pour alimenter un système de prévention des éruptions volcaniques.

Pour lutter contre les agressions extérieures (cycles thermiques, humidité, vents, grêle, etc...) le module est *encapsulé*, par exemple entre deux plaques de verre (technologie *bi-verre*).

Il faut aussi penser au refroidissement du panneau car, le rendement des photopiles étant faible, une grande partie du rayonnement reçu est transformée en chaleur qu'il est nécessaire d'évacuer pour éviter un échauffement trop important de l'installation. Ce refroidissement est obtenu, le plus souvent, par convection naturelle

* Application VII.6

Un panneau photovoltaïque, de 1,2 m de long par 0,4 m de large, est soumis à un éclairement de 1000 W/m^2 . Le rendement global des cellules est de 15 %. Le coefficient de foisonnement, correspondant au rapport de la surface des cellules sur la surface du panneau, est de 70 %.

Déterminons la puissance \dot{Q}_a à évacuer vers l'environnement

$$\dot{Q}_a = 1000 \times 0,70 \times 1,2 \times 0,4 \times (1 - 0,15) = 286 \text{ W.}$$

En réalité une faible partie du rayonnement solaire (de l'ordre de 4%) est réfléchi par la vitre qui recouvre le panneau. C'est d'autant d'énergie en moins à évacuer sous forme thermique.

Une installation PV ne se limite pas aux panneaux photovoltaïques. Il faut leur associer

- des batteries pour tenir compte du déphasage entre la production d'électricité et la consommation,
- une diode anti-retour qui évite le déchargement des batteries lorsque les panneaux ne sont plus ensoleillés (la nuit par exemple),
- un régulateur qui gère la charge des batteries en leur évitant d'être en surcharge ou en décharge profonde,
- éventuellement un onduleur pour transformer le courant continu en courant alternatif si on doit utiliser des appareils en 220 V alternatif.

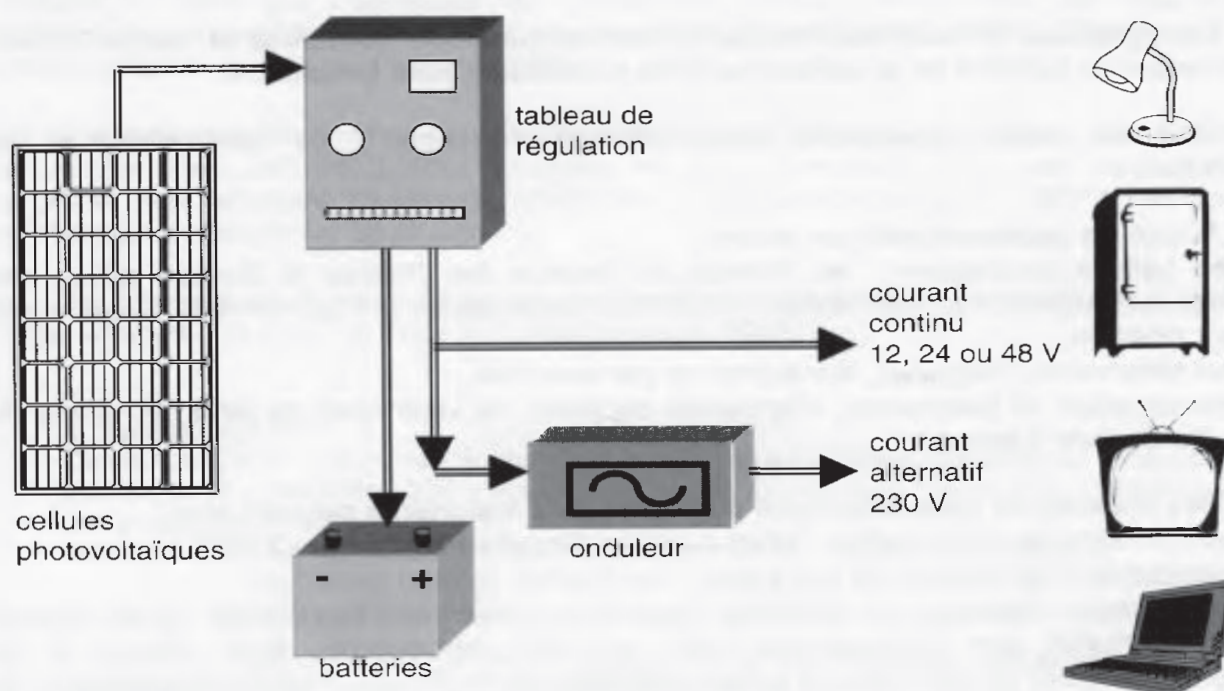


Figure VII.17 – Schéma de principe d'une installation photovoltaïque.

Toute installation utilisant l'énergie photovoltaïque doit être pensée en termes d'économie d'énergie. On privilégiera donc des équipements à basse consommation : lampes fluorescentes compactes, réfrigérateurs performants...

2.4 Avantages et inconvénients

Comme avantages on peut citer

- Absence de pièces mobiles, sources de pannes potentielles.
- Possibilité de moduler très facilement la puissance installée en faisant varier le nombre de panneaux PV interconnectés.
- Coût de fonctionnement négligeable dû en grande partie au premier point signalé plus haut; il faut simplement prendre soin à maintenir propre la surface des panneaux, l'inclinaison de ceux-ci limitant cette contrainte.
- Absence de pollution : il n'y a aucune émission de gaz à effet de serre, aucun bruit ou risque majeur.
- Énergie gratuite et renouvelable.

Les inconvénients sont les suivants

- Une technologie de fabrication délicate et complexe qui est loin d'être exempte de pollution.
- Sous nos latitudes, l'obligation de prévoir une autre source d'énergie pour pallier à la pénurie lors des périodes peu ensoleillées.
- L'obligation de prévoir des batteries de stockage pour subvenir aux besoins lors des périodes nocturnes.
- Inadaptation de la plupart des appareils électroménagers qui sont prévus pour fonctionner en courant alternatif et donc obligation de prévoir un onduleur.

2.5 Réalisations

Les systèmes utilisant des cellules photovoltaïques sont nombreux et variés. On peut les classer en fonction de la puissance qu'ils nécessitent pour fonctionner.

Pour de petites puissances, citons comme utilisations les calculatrices et les montres...

Autour de quelques watts on trouve

- des balises lumineuses : en France, le Service des Phares et Balises utilise des bouées équipées de trois modules PV à 120° pour capter le rayonnement quelque soit leur position.
- des téléphones d'urgence, sur autoroute par exemple,
- l'alimentation de téléviseurs, d'appareils de radio, de luminaires de jardin et même de .. tondeuses à gazon !

Des réalisations nécessitant une puissance plus importante peuvent être

- l'alimentation de relais radios : Mont Aurélien (Bouches du Rhône) 2 kW
- l'alimentation de refuges en montagne : les Évettes (Alpes) 5 kW
- l'alimentation électrique de satellites. Ceux-ci ont l'avantage de recevoir un flux solaire non perturbé par l'atmosphère mais qui, en contrepartie, sont soumis à un bombardement de particules et à des températures extrêmes : Hubble (2 panneaux de 2,8x12 m²) 4,5 kW
- des systèmes d'irrigation : Mead (USA) 25 kW

Pour des puissances supérieures de véritables centrales PV (photovoltaïques) ont été développées

- 5 kW à Sophia-Antipolis (France)
- 5 kW au Mont Soleil (Jura Suisse)
- 283 kW pour le Dock Midfield de l'aéroport de Zurich (Suisse)
- 1 MW à Tolède (Espagne), installation couplée à une centrale hydraulique
- 1 MW sur les toits du Palais des Congrès à Munich (Allemagne)
- 3 MW à Salerne (près de Naples, Italie)

Certaines réalisations concernent des systèmes PV à concentration (centrale de Tenerife).

Un projet de centrale PV en orbite a même été imaginé par la NASA.

Certaines applications des photopiles touchent au domaine du transport. Bien que marginales, celles-ci sont significatives d'un engouement pour une énergie motrice non polluante.

Ainsi sont apparues certaines épreuves comme, par exemple, le *World Solar Challenge* australien qui consiste à rejoindre à partir de Darwin la ville d'Adélaïde. Le trajet (3013 km) doit être parcouru par un véhicule mû par la seule énergie solaire.

L'aviation n'est pas en reste avec le *Pathfinder* puis le *Centurion* avions solaires sans pilote. Le tout dernier *Helios* a une envergure de 75 m et s'est élevé, le 13 août 2001, jusqu'à l'altitude record de 29 524 m (96 863 ft). Son aile est recouverte à l'extrados par 62 000 cellules photovoltaïques.

L'électricité solaire fournie par un système PV étant difficilement stockable, on peut envisager d'envoyer sur le réseau le surplus de production, moyennant rétribution. Un compteur électromécanique est installé entre l'onduleur et le réseau pour mesurer la

quantité d'électricité fournie à ce dernier. Le photovoltaïque relié au réseau connaît actuellement une forte croissance. Cette croissance est d'autant plus forte que le prix d'achat du kWh par l'opérateur du réseau est élevé. C'est le cas par exemple en Allemagne où le kWh est payé 45,7 c€ alors qu'EDF ne l'achète qu'à 15,25 c€ en France métropolitaine (arrêté du 13 mars 2002).

L'avenir de l'électricité PV réside principalement dans la baisse des coûts de production des cellules. L'effet d'échelle en est un moyen. Ainsi une usine pouvant produire annuellement 13 MW de photopiles a-t-elle été ouverte en 1998 en Allemagne (*Pilkington et Deutsche Shell AG*).

On trouvera en Annexe quelques données sur la puissance photovoltaïque installée dans chacun des pays de l'Union Européenne fin 2001

* Application VII.7

On veut entraîner une pompe à eau grâce à un moteur électrique alimenté par photopiles. La puissance du moteur $P=4$ kW. L'éclairement solaire moyen local $I^*=600$ W/m². Le rendement des photopiles $\eta=15$ %.

Déterminons la surface S de cellules nécessaire pour faire marcher l'installation.

$$S = \frac{P}{I^* \eta} = \frac{4000}{600 \times 0,15} = 44,5 \text{ m}^2.$$

Le cas des pompes centrifuges est intéressant car le fluide véhiculé sert de stockage; il n'est pas nécessaire de prévoir un ensemble de batteries toujours chères et de durée de vie limitée. L'installation se limite aux panneaux solaires et à la pompe entraînée par un moteur électrique continu. Ce type d'installation est autonome et fiable ce qui lui confère tout son intérêt pour les sites isolés.

* Application VII.8

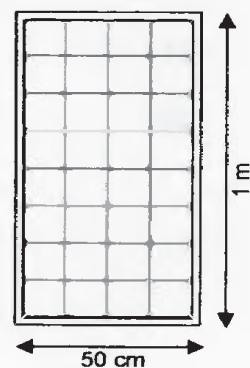
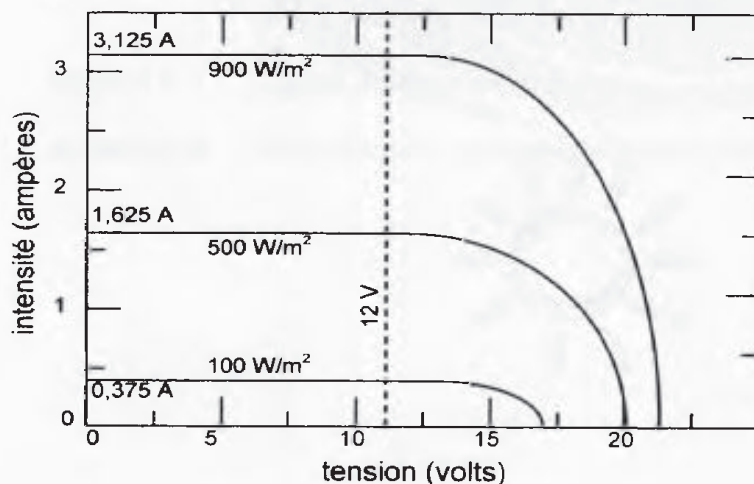
On veut alimenter en électricité un refuge de montagne au moyen d'une installation PV (photovoltaïque). On dispose de modules dont les caractéristiques sont données à la figure ci-dessous.

La surface d'un module $S_m=0,5 \times 1=0,5$ m²

L'électricité produite est stockée dans des batteries au plomb de 12 volts.

Le refuge est ouvert de juin à septembre.

Déterminons le nombre N_m de modules nécessaires, pour chaque mois d'utilisation, afin qu'une autonomie de 5 jours sans insolation soit assurée en 15 jours de ciel clair. La consommation journalière moyenne d'électricité $Q_0=25$ kWh.



Des mesures météorologiques locales ont permis de déterminer l'irradiation solaire globale par ciel clair $G_0(i, \gamma)$ pour la journée du 15 de chacun des mois concernés. Les données i et γ correspondent respectivement à l'inclinaison et à l'orientation azimutale que l'on compte donner à la batterie de capteurs. Les résultats sont les suivants

mois	juin	juillet	août	septembre
$G_0(i, \gamma)$ kWh/m ² .jour	9,1	9,1	8,6	7,6

Le rendement moyen des photopiles est déterminé par la figure précédente donnant les caractéristiques d'un panneau de cellules pour différents ensoleillements.

À partir de cette figure, on peut dresser le tableau suivant

G^* W/m ²	I A	I.V W/panneau	P_e W/m ²	η %
100	0,375	4,5	9	9
500	1,625	19,5	39	7,8
900	3,125	37,5	75	8,3

On en déduit un rendement moyen considéré indépendant de G^* $\bar{\eta} = \frac{9 + 7,8 + 8,3}{3} = 8,4 \%$

L'équation caractérisant le problème est la suivante

$$15 [G_0(i, \gamma) \bar{\eta} (N_m S_m) - \dot{Q}_0] = 5 \dot{Q}_0$$

Le terme entre crochets correspond à l'énergie pouvant être accumulée pendant une journée de ciel clair. Pendant 15 jours de ciel clair, l'énergie totale accumulée doit être égale à l'énergie consommée pendant 5 jours de ciel couvert, durant lesquels l'apport électrique d'origine solaire peut être considéré négligeable.

On a donc

$$N_m = \frac{\left(\frac{5}{15} + 1\right) \dot{Q}_0}{G_0(i, \gamma) \bar{\eta} S_m} = \frac{\left(\frac{5}{15} + 1\right) 25}{G_0(i, \gamma) 0,084 \times 0,5} = \frac{794}{G_0(i, \gamma)}$$

Le nombre de modules nécessaires pour chaque mois est le suivant

mois	juin	juillet	août	septembre
N_m	87	87	92	104



ANNEXES

ANNEXE A	Caractéristiques de l'air	214
ANNEXE B	Caractéristiques de l'eau	215
ANNEXE C	Table de la vapeur d'eau saturée	216
ANNEXE D	Éléments d'échange thermique	217
	1. Rayonnement	217
	2. Conduction	221
	3. Convection	222
ANNEXE E	Détermination des pertes de charge hydrauliques	225
	1. Pertes de charge régulières	225
	2. Pertes de charge singulières	227
ANNEXE F	Constantes physiques	230
ANNEXE G	Les unités en énergétique	231
ANNEXE H	Chiffres clés sur l'énergie solaire	232
	1. Les capteurs solaires thermiques	232
	2. Les capteurs solaires photovoltaïques	234
ANNEXE I	Organismes, sociétés et associations s'intéressant à l'énergie solaire	236
ANNEXE J	Sigles et abréviations	239
ANNEXE K	Petit dictionnaire anglais-français	240

ANNEXE A

CARACTÉRISTIQUES DE L'AIR

T °C	ρ kg/m ³	c_p J/kg.K	μ 10 ⁻⁶ Pa.s	ν 10 ⁻⁶ m ² /s	λ 10 ⁻³ W/m.K	a 10 ⁻⁶ m ² /s	Pr
0	1,292	1000	17,0	13,2	23,8	18,4	0,716
5	1,269	1001	17,3	13,6	24,1	19,0	0,717
10	1,247	1001	17,5	14,1	24,4	19,6	0,717
15	1,225	1002	17,8	14,5	24,8	20,2	0,718
20	1,204	1003	18,0	14,9	25,1	20,8	0,719
25	1,184	1003	18,2	15,4	25,5	21,4	0,719
30	1,164	1004	18,5	15,9	25,8	22,0	0,720
35	1,146	1005	18,7	16,3	26,1	22,7	0,720
40	1,127	1006	18,9	16,8	26,4	23,3	0,721
45	1,110	1006	19,2	17,3	26,8	24,0	0,721
50	1,092	1007	19,4	17,8	27,1	24,6	0,722
55	1,076	1008	19,6	18,2	27,4	25,3	0,722
60	1,060	1009	19,9	18,7	27,7	25,9	0,723
65	1,044	1010	20,1	19,2	28,0	26,6	0,723
70	1,029	1010	20,3	19,7	28,3	27,3	0,724

ρ masse volumique
 c_p chaleur spécifique
 μ viscosité dynamique
 λ conductivité thermique

a diffusivité $\left(\frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \right)$

Pr nombre de Prandtl $\left(\frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \right)$

ANNEXE B

CARACTÉRISTIQUES DE L'EAU

T °C	ρ kg/m ³	c_p J/kg.K	μ 10 ⁻³ Pa.s	ν 10 ⁻⁶ m ² /s	λ W/m.K	a 10 ⁻⁶ m ² /s	Pr
0	1000	4220	1,789	1,79	0,555	0,132	13,60
5	999	4208	1,548	1,55	0,570	0,136	11,42
10	999	4195	1,306	1,31	0,585	0,140	9,37
15	998	4189	1,156	1,16	0,592	0,141	8,18
20	998	4183	1,005	1,01	0,598	0,143	7,03
25	997	4180	0,904	0,91	0,609	0,146	6,21
30	996	4176	0,802	0,81	0,619	0,149	5,41
35	994	4175	0,728	0,73	0,626	0,151	4,86
40	992	4174	0,653	0,66	0,632	0,153	4,31
45	990	4175	0,602	0,61	0,639	0,154	3,93
50	988	4175	0,550	0,56	0,645	0,156	3,56
55	985	4177	0,510	0,52	0,650	0,158	3,28
60	983	4179	0,470	0,48	0,654	0,159	3,00
65	980	4182	0,438	0,45	0,659	0,161	2,78
70	978	4185	0,406	0,42	0,664	0,162	2,56
75	975	4192	0,381	0,39	0,668	0,163	2,39
80	972	4199	0,355	0,37	0,672	0,165	2,22
85	968	4200	0,335	0,35	0,674	0,166	2,09
90	965	4201	0,315	0,33	0,676	0,167	1,96
95	962	4209	0,299	0,31	0,678	0,167	1,85
100	958	4216	0,282	0,29	0,680	0,168	1,75

ρ masse volumique
 c_p chaleur spécifique
 μ viscosité dynamique
 λ conductivité thermique

a diffusivité $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$

Pr nombre de Prandtl $Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}$

ANNEXE C

TABLE DE LA VAPEUR D'EAU SATURÉE

température °C	pression Pa	volume massique m ³ /kg		enthalpie kJ/kg		
T	P _{sat}	v _l	v _v	h _l	h _v	h _g
0,01	611	0,001000	206,14	0,01	2 501,3	2 501,4
5	872	0,001000	147,12	20,98	2 489,6	2 510,6
10	1 228	0,001000	106,38	42,01	2 477,7	2 519,8
15	1 705	0,001001	77,93	62,99	2 465,9	2 528,9
20	2 339	0,001002	57,79	83,96	2 454,1	2 538,1
25	3 169	0,001003	43,36	104,89	2 442,3	2 547,2
30	4 246	0,001004	32,89	125,79	2 430,5	2 556,3
35	5 628	0,001006	25,22	146,68	2 418,6	2 565,3
40	7 384	0,001008	19,52	167,57	2 406,7	2 574,3
45	9 593	0,001010	15,26	188,45	2 394,8	2 583,2
50	12 349	0,001012	12,03	209,33	2 382,7	2 592,1
55	15 758	0,001015	9,568	230,23	2 370,7	2 600,9
60	19 940	0,001017	7,671	251,13	2 358,5	2 609,6
65	25 030	0,001020	6,197	272,06	2 346,2	2 618,3
70	31 190	0,001023	5,042	292,98	2 333,8	2 626,8
75	38 580	0,001026	4,131	313,93	2 321,4	2 635,3
80	47 390	0,001029	3,407	334,91	2 308,8	2 643,7
85	57 830	0,001033	2,828	355,90	2 296,0	2 651,9
90	70 140	0,001036	2,361	376,92	2 283,2	2 660,1
95	84 550	0,001040	1,982	397,96	2 270,2	2 668,1
100	101 330	0,001044	1,673	419,04	2 257,0	2 676,1

Les indices l et v caractérisent respectivement une grandeur relative à l'eau sous forme liquide et sous forme vapeur

ANNEXE D

ÉLÉMENTS D'ÉCHANGES THERMIQUES

1. Rayonnement

Corps noir (CN)

Corps dont la surface absorbe l'intégralité d'un rayonnement incident quelles que soient la longueur d'onde et la direction de celui-ci. C'est un absorbeur parfait. Pour cette raison, il sert de référence pour les surfaces réelles.

La surface d'un corps noir élevée à la température T rayonne un spectre continu.

L'énergie $E_b(\lambda, T)$ rayonnée par un CN à la température T pour la longueur d'onde λ est donnée par la *loi de Planck*

$$E_b(\lambda, T) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (\text{en W/m}^2 \cdot \mu\text{m})$$

avec $C_1 = 3,743 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$
 $C_2 = 1,4387 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

L'énergie totale $E_b(T)$ rayonnée à la température T est déterminée par la *loi de Stefan-Boltzmann*

$$E_b(T) = \int_0^\infty \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} d\lambda = \sigma T^4 \quad (\text{en W/m}^2)$$

avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

La longueur d'onde du maximum d'émission λ_m est donnée par la *formule de Wien*

$$\lambda_m T = 2898$$

où λ_m est exprimée en μm et T en degrés kelvin.

La fraction d'énergie rayonnée dans la bande spectrale $[0, \lambda]$ est déterminée en relevant dans la table du CN la valeur de la grandeur z lue en face de celle de $x = \frac{\lambda}{\lambda_m}$

La définition de z est la suivante $z = \frac{\int_0^\lambda E_b(\lambda', T) d\lambda'}{E_b(T)}$

x	z %	x	z %	x	z %
0,1	$5,49 \cdot 10^{-18}$	2,1	74,49	4,1	94,35
0,2	$4,66 \cdot 10^{-6}$	2,2	76,74	4,2	94,68
0,3	$5,59 \cdot 10^{-3}$	2,3	78,74	4,3	94,98
0,4	0,16	2,4	80,54	4,4	95,27
0,5	1,01	2,5	82,15	4,5	95,53
0,6	3,26	2,6	83,59	4,6	95,77
0,7	7,14	2,7	84,89	4,7	95,99
0,8	12,39	2,8	86,06	4,8	96,20
0,9	18,52	2,9	87,12	4,9	96,40
1	25,04	3	88,07	5	96,58
1,1	31,56	3,1	88,94	5,1	96,75
1,2	37,84	3,2	89,72	5,2	96,91
1,3	43,72	3,3	90,44	5,3	97,06
1,4	49,13	3,4	91,09	5,4	97,20
1,5	54,04	3,5	91,69	5,5	97,33
1,6	58,47	3,6	92,23	5,6	97,45
1,7	62,44	3,7	92,73	5,7	97,57
1,8	65,99	3,8	93,19	5,8	97,68
1,9	69,15	3,9	93,61	5,9	97,78
2	71,97	4	93,99	6	97,88

Tableau D.1 - Table du corps noir

Facteurs radiatifs

Lorsqu'un rayonnement frappe une surface réelle, une fraction de celui-ci est réfléchi, une autre absorbée et enfin une troisième peut-être transmise si le corps est *transparent*. En notant ρ la fraction réfléchi (ou *facteur de réflexion*), α la fraction absorbée (ou *facteur d'absorption*) et τ la fraction transmise (ou *facteur de transmission*), on a évidemment

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

Notons que ces facteurs sont *a priori* fonction de l'angle d'incidence θ , de la longueur d'onde λ , ainsi que de la température T et de l'état (poli, rugueux...) de la surface.

Quand le rayonnement incident est réfléchi de façon isotrope, on parle de surface *diffuse*. Quand cette réflexion se fait sous le même angle, on dit que la surface est *spéculaire*.

Notons qu'une surface réelle n'est jamais parfaitement diffuse, ou parfaitement spéculaire. Elle possède, avec plus ou moins d'importance, les deux propriétés.

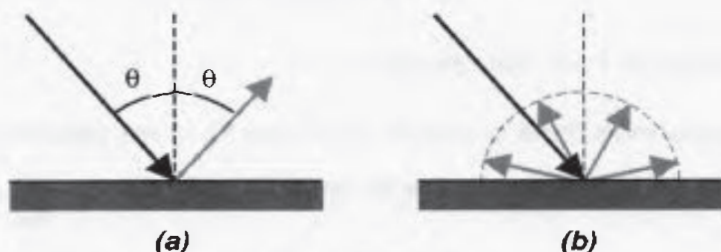


Figure D.1 – Réflexion (a) spéculaire, (b) diffuse

On définit le *facteur d'émission* ε comme étant le rapport de l'énergie émise par une surface (ou *émittance énergétique*) sur l'énergie qu'elle émettrait si elle pouvait être considérée comme *noire*. On a donc

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b}$$

La loi de Kirchhoff permet d'écrire

$$\varepsilon = \alpha.$$

Les égalités précédentes ne sont vérifiées, en toute rigueur, que pour une température T , une longueur d'onde λ et une direction d'émission fixées.

En général, on considère des *surfaces diffuses*. Dans ce cas les facteurs radiatifs sont indépendants de la direction; il en est ainsi de l'intensité I_d du rayonnement. L'énergie émise dans une direction donnée α est donc égale à l'intensité multipliée par la surface apparente de la source (cf. figure D.2).

Dans l'angle solide $d\Omega$, l'énergie émise est égale à

$$I_d dS \cos \alpha d\Omega$$

avec

$$d\Omega = 2\pi \sin \alpha d\alpha.$$

La puissance rayonnée par la surface élémentaire dS est obtenue par intégration sur un demi-espace

$$E_d \cdot dS = 2\pi I_d dS \int_0^{\pi/2} \sin \alpha \cos \alpha d\alpha$$

où E_d est l'émittance de la surface dS (en W/m^2).

On obtient

$$E_d = \pi I_d.$$

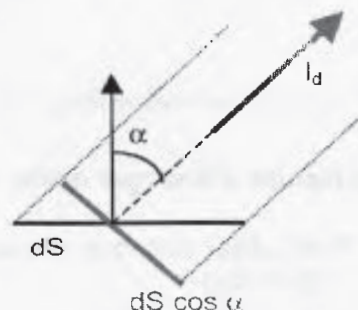


Figure D.2

On appelle *surface grise* une surface pour laquelle les facteurs radiatifs sont indépendants de la longueur d'onde λ . On travaille le plus souvent sur des bandes spectrales (bande solaire, bande IR...) pour lesquelles on peut considérer les facteurs radiatifs comme constants.

Facteurs de forme

La fraction d'énergie émise par une surface diffuse S_1 et reçue par une surface diffuse S_2 est appelée *facteur de forme* F_{12} .

Pour des surfaces élémentaires dS_1 et dS_2 , la fraction d'énergie émise par dS_1 et reçue par dS_2 s'écrit (cf. fig. D.3)

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{r^2} dS_2$$

On a l'égalité suivante (loi de réciprocité)

$$S_1 F_{12} = S_2 F_{21}.$$

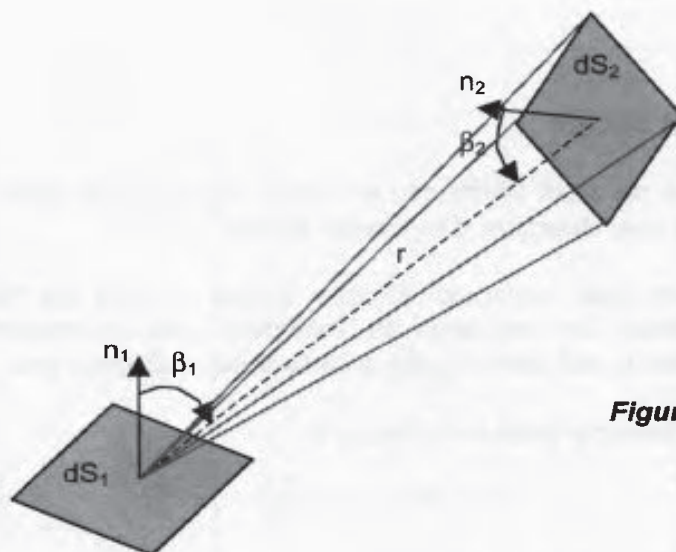


Figure D.3

Échange d'énergie entre surfaces grises et diffuses ($T_1 > T_2$)

- Petit objet convexe placé dans une enceinte large ($S_1 < S_2$)

$$\dot{q} = \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) S_1 \text{ (en W)}$$



Figure D.4

- Deux murs parallèles infinis

$$\dot{q} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \text{ (en W/m}^2\text{)}$$

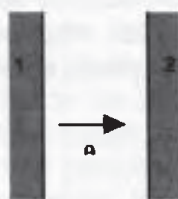


Figure D.5

- Deux cylindres infinis coaxiaux ($r_1 < r_2$)

$$\dot{q} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4) S_1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \frac{r_1}{r_2}}$$

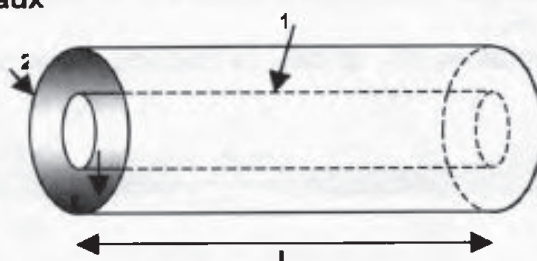


Figure D.6

2. Conduction

Dans un matériau solide la transmission de la chaleur est régie par l'équation dite de la chaleur qui s'écrit

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T + \dot{q}$$

dans laquelle \dot{q} est une puissance dissipée par unité de volume du milieu. Ce peut être une puissance apportée par une réaction chimique exothermique (prise du béton par exemple), par effet Joule (résistance électrique noyée dans le matériau) ou bien par fission de noyaux d'un matériau nucléaire (uranium).

Si aucune puissance n'est dissipée dans le milieu et si de plus on considère un régime permanent (c'est-à-dire que la température est indépendante du temps), l'équation précédente s'écrit tout simplement

$$\Delta T = 0.$$

Dans le cas où l'écoulement de la chaleur peut être considéré monodirectionnel suivant la direction x , cette dernière égalité s'écrit

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$$

ce qui donne

$$T = A x + B$$

avec A et B deux constantes dépendant des conditions aux limites. L'évolution de la température est linéaire.

Pour déterminer le flux de chaleur \dot{q} qui traverse l'isolant, il faut se pencher sur l'équation dite de Fourier qui régit le phénomène de transfert thermique par conduction. Cette équation s'écrit

$$\vec{q} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad } T}$$

La quantité notée λ est appelée la *conductivité* du matériau. Elle dépend en toute rigueur de la température T mais compte tenu des écarts relativement faible des températures en énergétique solaire, on peut en première approximation la considérer constante.

Lorsque le gradient des températures est monodirectionnel, suivant x par exemple (cf. fig. D.7) cette équation devient

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dx},$$

ce qui, compte tenu de la conservation du flux et de la linéarité de la variation de la température, donne

$$\dot{q} = -\lambda_1 \frac{T_i - T_1}{e_1} = -\lambda_2 \frac{T_2 - T_i}{e_2}$$

Une similitude électrique¹ (cf. fig. D.8) permet d'écrire

¹ On assimile l'écart de température ΔT à la tension électrique U et le flux de chaleur \dot{q} à l'intensité du courant I . Comme $U = R I$, on obtient $\Delta T = R \dot{q}$.

$$(T_1 - T_i) = R_1 \dot{q} \quad \text{et} \quad (T_i - T_2) = R_2 \dot{q}$$

où $R_i = \frac{e_i}{\lambda_i}$ est appelée *résistance thermique*.

On en tire

$$(T_1 - T_2) = (R_1 + R_2) \dot{q} = R \dot{q}$$

avec $R = R_1 + R_2$
ou encore

$$\dot{q} = K (T_1 - T_2)$$

avec K , appelée *conductance thermique* globale du mur, est l'inverse de la résistance thermique totale R de celui-ci.

Dans le cas du mur de la figure D.7, on a

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2}}$$

et dans le cas d'un mur composé de n couches, on aurait

$$\dot{q} = \frac{T_1 - T_2}{\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i}}$$

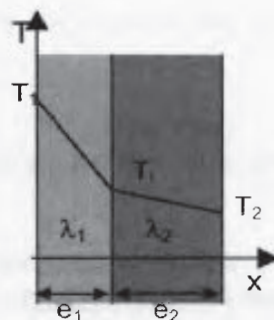


Figure D.7 – Mur composé.

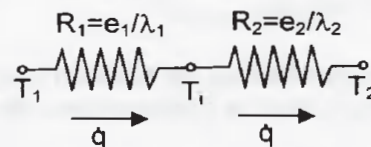


Figure D.8 – Similitude électrique.

3. Convection

On trouvera ci-dessous quelques corrélations empiriques permettant de déterminer le coefficient h d'échange thermique par convection naturelle ou forcée.

Dans le système international d'unités, h est en $W/m^2.K$.

Caractéristiques du fluide concerné

- ρ masse volumique (kg/m^3)
- μ viscosité dynamique (Pa)
- λ conductivité thermique ($W/m.K$)
- c_p chaleur massique ($J/kg.K$)

Les nombres sans dimension que l'on rencontre sont les suivants, avec x longueur caractéristique (en m)

nombre de Reynolds $Re_x = \frac{\rho c x}{\mu}$ avec c vitesse caractéristique (m/s)

nombre de Prandtl $Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}$

nombre de Grashof $Gr_x = \frac{\rho^2 g \Delta T x^3}{\mu^2 T}$ avec $g=9,81 \text{ m/s}^2$, ΔT écart de température caractéristique et T température caractéristique.

nombre de Nusselt $Nu_x = \frac{h x}{\lambda}$

3.1 Convection naturelle

• Entre deux plaques planes définissant un volume fermé

La longueur caractéristique est b (épaisseur de la lame d'air).
L'angle i est en degrés.

$$h = \frac{Nu \lambda}{b}$$

$$Gr < 1700 + 47,8 i \quad Nu = 1,013$$

$$Gr > 80\,000 \quad Nu = 2,5 + 0,0133 (90 - i)$$

$$\text{autrement} \quad Nu = [0,06 + 3 \cdot 10^{-4} (90 - i)] Gr^{0,33}$$

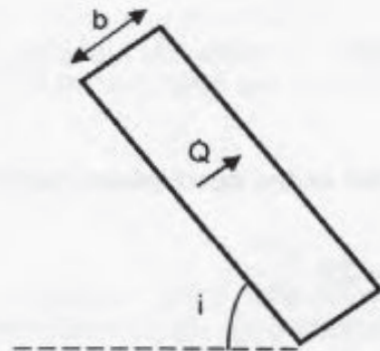


Figure D.9

• Autour d'un cylindre horizontal

La longueur caractéristique est D (diamètre du cylindre).

$\Delta T = T_p - T_f$ (T_p température de la surface du cylindre, T_f température de l'air en dehors de la couche limite thermique)

On prend comme température caractéristique $T = \frac{T_f + T_p}{2}$

$$10^3 < Gr \quad Pr < 10^9 \quad h = 1,30 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4}$$

$$10^9 < Gr \quad Pr < 3 \cdot 10^{12} \quad h = 1,11 \Delta T^{1/3}$$



Figure D.10

3.2 Convection forcée

• Écoulement laminaire dans une conduite

La couche limite est supposée complètement développée.

c vitesse moyenne de l'écoulement (m/s)

La paroi du tube est soumise à flux d'énergie \dot{Q}^* constant $h = 4,36 \frac{\lambda}{D}$

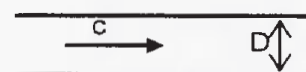


Figure D.11

La paroi du tube est à température constante $h = 3,66 \frac{\lambda}{D}$

• **Écoulement turbulent dans une conduite**

$$h = 0,023 \frac{\lambda}{D} Re_D^{0,8} Pr^{0,4} \quad (\text{formule utilisable avec l'air ou l'eau})$$

• **air s'écoulant perpendiculairement à un cylindre**

$$h = A \frac{\lambda}{D} Re_D^n$$

Re	A	n
0,4 – 4	0,891	0,330
4 – 40	0,821	0,385
40 – 4 000	0,615	0,466
4 000 – 40 000	0,174	0,618
40 000 – 400 000	0,0239	0,805

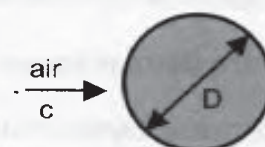


Figure D.12

• **Air entre deux plans parallèles en écoulement turbulent**

$$h = 2,6 \frac{c^{0,8}}{e^{0,2}}$$

avec c vitesse moyenne de l'écoulement (en m/s)
 e écartement des deux plans (en m).

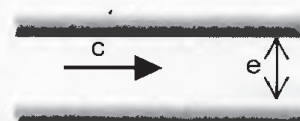


Figure D.13

• **Air sur une plaque plane**

Cette corrélation sert principalement au calcul de l'échange thermique par convection forcée due au vent sur un capteur plan.

$$h = 5,7 + 3,8 w$$

où w (en m/s) est la composante de la vitesse de l'air parallèle au capteur

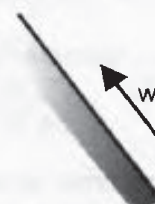


Figure D.14

ANNEXE E

DÉTERMINATION DES PERTES DE CHARGE HYDRAULIQUES

L'installation d'un système solaire faisant intervenir un fluide caloporteur (air ou eau) nécessite la connaissance des pertes de charge. En effet le dimensionnement de la pompe ou du ventilateur nécessaire pour mouvoir le fluide dépend directement de la valeur de ces pertes.

On distingue les pertes de charge régulières causées par le frottement fluide sur les parois des conduites et les pertes de charge singulières localisées aux endroits où une modification de l'orientation moyenne des filets fluides se fait sentir par exemple dans un coude, un rétrécissement ou élargissement de la conduite, au passage d'un filtre, d'une vanne, etc.

On trouvera à la fin de cette annexe quelques valeurs du coefficient de perte de charge singulière correspondant à des éléments que l'on rencontre couramment dans les circuits de fluides.

1. Pertes de charge régulières

Un fluide, de viscosité μ et de masse volumique ρ , se déplaçant dans une conduite rectiligne de longueur L et de diamètre D , est soumis à une perte de charge Δp calculée de la façon suivante

On commence par déterminer la vitesse c du fluide

$$c = \frac{4 \dot{v}}{\pi D^2},$$

puis le nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho c D}{\mu}$$

La perte de charge s'écrit

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{D} \rho \frac{c^2}{2}$$

formule dans laquelle Δp est exprimée en pascals et où λ , appelé *coefficient de perte de charge régulière*, est déterminée par l'une des deux relations suivantes

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

(formule de Poiseuille) pour un écoulement laminaire ($Re < 2000$ environ)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} + 0.27 \frac{\varepsilon}{D} \right)$$

(formule dite de Colebrook) pour un écoulement turbulent ($Re > 2000$ environ). La *rugosité* ε correspond à la hauteur moyenne des aspérités des parois de la tuyauterie. Le rapport ε/D

est appelé *rugosité relative*. La rugosité dépend fortement du type de matériau utilisé. En énergétique solaire on emploie couramment des tubes en cuivre ou polyéthylène, matériaux pour lesquels la rugosité relative est très faible.

La formule de Colebrook n'étant pas linéaire, on peut la résoudre par une méthode numérique (dichotomie par exemple) ou bien se servir de l'abaque ci-dessous.

Remarque 1

Dans le cas où la conduite n'est pas circulaire¹ on peut conserver les mêmes expressions en remplaçant le diamètre D par le *diamètre hydraulique* D_h donné par l'expression suivante

$$D_h = \frac{4 S}{\chi}$$

où S est la section de passage du fluide et χ le périmètre mouillé.

Par exemple, dans le cas d'une conduite de section droite rectangulaire ($a \times b$), on a $\chi = 2(a+b)$ et $S = a \times b$, d'où

$$D_h = \frac{2 a b}{a + b}$$

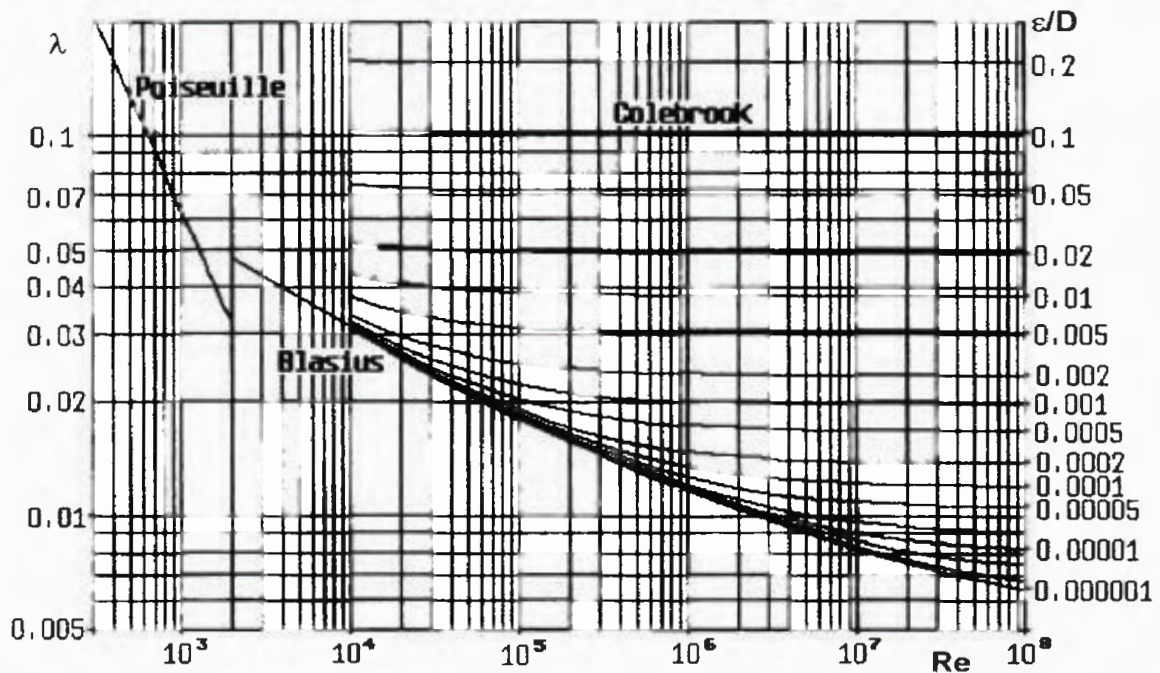


Figure E.1 – Diagramme permettant la détermination du coefficient de perte de charge régulière λ en fonction du nombre de Reynolds Re et de la rugosité relative ε/D .

¹ C'est le cas des conduites de circulation d'air conditionné qui sont le plus souvent à section rectangulaire.

Remarque 2

En hydraulique la perte de charge est le plus souvent donnée en mètres de hauteur fluide on la note j .

Mais on peut aussi la donner en joules par kilogramme de fluide véhiculé on la note J .

perte de charge régulière		
forme	notation et formule	unité
pression	$\Delta p = \lambda \frac{L}{D} \rho \frac{c^2}{2}$	Pa
hauteur fluide	$j = \lambda \frac{L}{D} \frac{c^2}{2g}$	m
énergie	$J = \lambda \frac{L}{D} \frac{c^2}{2}$	J/kg

Tableau E.1 – Modes d'écriture de la perte de charge.

2. Pertes de charge singulières

Elles sont plus difficiles à déterminer par le calcul. Néanmoins, on peut en avoir une idée grâce à de nombreuses mesures expérimentales qui ont permis de déterminer le coefficient ξ qui intervient dans l'expression de la perte de charge singulière

$$\Delta p = \xi \rho \frac{c^2}{2} \quad (\text{en Pa})$$

ou bien

$$j = \xi \frac{c^2}{2g} \quad (\text{en m})$$

ou bien

$$J = \xi \frac{c^2}{2} \quad (\text{en J/kg}).$$

La détermination de la perte de charge totale d'un circuit se détermine en faisant la somme des pertes de charge régulières et singulières, d'où

$$\Delta p_{\text{circuit}} = \left(\lambda \frac{L}{D} + \xi \right) \rho \frac{c^2}{2} \quad (\text{en Pa})$$

ou bien

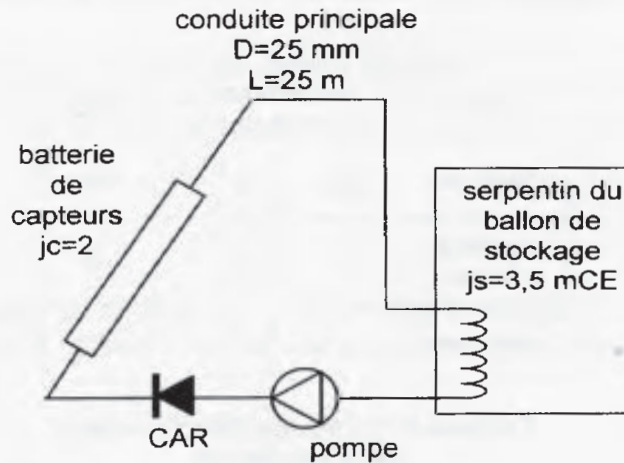
$$j_{\text{circuit}} = \left(\lambda \frac{L}{D} + \xi \right) \frac{c^2}{2g} \quad (\text{en m})$$

ou bien encore

$$J_{\text{circuit}} = \left(\lambda \frac{L}{D} + \xi \right) \frac{c^2}{2} \quad (\text{en J/kg}).$$

* Application

Soit à déterminer la puissance du circulateur d'un circuit hydraulique alimentant une batterie de capteurs solaires comme indiqué au schéma ci-dessous.



La longueur totale de tuyauterie de 25 mm de diamètre s'élève à L=25 m. La rugosité des tubes est négligeable. La somme des coefficients de pertes de charge singulières se monte à 13. Le débit d'eau $\dot{v}=1,2 \text{ m}^3/\text{h}$ à la température moyenne $T_f=40^\circ\text{C}$.

$$\text{La vitesse } c = \frac{4 \dot{v}}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot \frac{1,2}{3600}}{\pi (25 \cdot 10^{-3})^2} = 0,68 \text{ m/s}$$

$$\text{Le nombre de Reynolds } Re = \frac{\rho c D}{\mu} = \frac{992 \times 0,68 \times 0,025}{0,653 \cdot 10^{-3}} = 25825.$$

L'écoulement est donc turbulent. On utilisant la formule de Colebrook. En négligeant le terme de rugosité, on trouve $\lambda=0,024^{(2)}$.

La perte de charge d'un capteur se monte à $j_c=2 \text{ m}$ de colonne d'eau. Celle du serpentin de l'échangeur du ballon de stockage se monte à $j_s=3,5 \text{ mCE}^3$. D'où la perte de charge du circuit

$$\begin{aligned} \Delta p &= \left(\lambda \frac{L}{D} + \xi \right) \rho \frac{c^2}{2} + \rho g (j_c + j_s) \\ &= \left(0,024 \frac{25}{0,025} + 13 \right) 992 \frac{0,68^2}{2} + 992 \times 9,81 (2 + 3,5) = 16090 \text{ Pa} = 0,62 \text{ bar} \end{aligned}$$

La puissance utile (celle qui est fournie au fluide) s'élève à

$$P_u = \Delta p \dot{v} = 0,62 \cdot 10^5 \times 1,2/3600 = 21 \text{ W}$$

La puissance effective P_e se déduit de la puissance utile en la divisant par le rendement global η_g de la pompe

$$P_e = \frac{P_u}{\eta_g} = \frac{21}{0,5} = 42 \text{ W}$$

² Cette valeur est très courante avec les tuyauteries de faible rugosité. Si l'on ne possède pas de moyen de calcul, on peut se fixer arbitrairement la valeur du coefficient de perte de charge linéaire λ à la valeur 0,02.

³ mCE=mètre de Colonne d'Eau

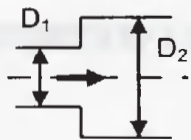
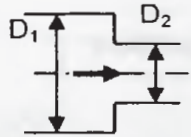
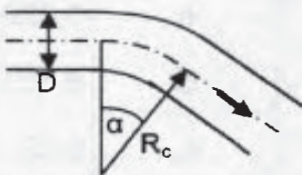
élément	schéma	formule
élargissement brusque		$\xi = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 + \frac{1}{9} \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4$
rétrécissement brusque		$\xi = 0,5 \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{1,6} \right]$
coude (α en degrés)		$\xi = \left[0,131 + 1,847 \left(\frac{D}{2 R_c} \right)^{3,5} \right] \frac{\alpha}{90}$

Tableau E.2 - Tableau permettant la détermination du coefficient de perte de charge singulière ξ pour quelques géométries courantes.

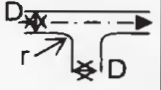


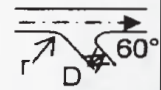

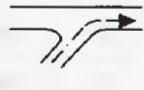
coudes							
A	B	C		r/D	A	B	C
			ξ	0	0,05	2	2
				0,2	0,05	1	1
			ξ	0	0,05	1	1
				0,2	0,05	0,5	0,5

Tableau E.3 - Tableau permettant la détermination du coefficient de perte de charge singulière pour quelques géométries courantes.

ANNEXE F

CONSTANTES PHYSIQUES

CONSTANTE	symbole	valeur
vitesse de la lumière	c	299 792 458 m/s
constante de Planck	h	$6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s
constante de la gravitation	G	$6,673 \cdot 10^{-11}$ m ³ /kg.s ²
constante d'Avogadro	N _A	$6,02 \cdot 10^{23}$ /mole
constante de Boltzmann	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
constante des gaz parfaits	R	8,314472 J/mole.K
constante de Stefan	σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m ² .K ⁴
charge de l'électron	q	$1,602 \cdot 10^{-19}$ C

PRÉFIXES USUELS						
d	déci	10 ⁻¹		da	déca	10
c	centi	10 ⁻²		h	hecto	10 ²
m	milli	10 ⁻³		k	kilo	10 ³
μ	micro	10 ⁻⁶		M	méga	10 ⁶
n	nano	10 ⁻⁹		G	giga	10 ⁹
p	pico	10 ⁻¹²		T	téra	10 ¹²

ANNEXE G

LES UNITÉS EN ÉNERGÉTIQUE

énergie	symbole	équivalent en joules
joule	J	1
British Thermal unit	BTU	1055
calorie	cal	4,1855
électron-volt	eV	$1,6 \cdot 10^{-19}$
erg	erg	10^{-7}
gaz naturel	m ³ de GN	$3,767 \cdot 10^7$
kilowattheure	kWh	$3,6 \cdot 10^6$
langley	langley	41860 /m ²
thermie	th	$4,186 \cdot 10^6$
tonne équivalent charbon	TEC	$2,79 \cdot 10^{10}$
tonne équivalent pétrole	TEP	$4,186 \cdot 10^{10}$
trinitrotoluène	kg de TNT	$4,18 \cdot 10^6$

puissance	symbole	équivalent en watts
watt	W	1
cheval vapeur	ch	735,5
horse power	hp	745,7

ANNEXE H

CHIFFRES CLÉS SUR L'ÉNERGIE SOLAIRE

(source EurObserv'ER)

1. Les capteurs solaires thermiques

Surface installée en 2001 dans les pays de l'UE en fonction du type de capteurs en milliers de m ²				
pays	vitrés	non vitrés	sous vide	total
Allemagne	675,0	90,0	135,0	900,0
Grèce	157,9	9,0	2,2	169,1
Autriche	160,0			160,0
Italie	50,0	3,0	2,0	55,0
Espagne	40,0	5,0	5,0	50,0
France	38,0	8,0		46,0
Pays-Bas	32,0	3,0		35,0
Danemark	22,0	3,4		25,4
Suède	17,0	0,4		17,4
Grande-Bretagne	6,5	4,0		10,5
Portugal	8,0			8,0
Belgique	2,0	0,5	0,1	2,6
Finlande	1,3			1,3
TOTAL	1 209,7	126,3	144,3	1 480,3

Surface cumulée installée fin 2001 dans le Monde en milliers de m ²		
pays	surface	%
Chine	5 500	64
Europe	1 480	17
Turquie	700	8
Japon	300	3
autres	605	7
Monde	8 585	100



Capteurs solaires en toiture (Grèce)

Surface cumulée fin 2001 dans l'UE		
Pays	en milliers de m ²	en m ² pour 1000 habitants
Allemagne	4 265,2	52,0
Grèce	2 976,0	280,8
Autriche	2 339,1	288,8
France	550,0	11,2
Espagne	440,0	11,1
Italie	400,0	7,0
Pays-Bas	275,0	17,5
Danemark	260,0	49,1
Portugal	225,0	22,7
Suède	190,0	21,3
Grande-Bretagne	160,0	2,7
Belgique	58,0	5,7
Finlande	11,5	2,2
Irlande	1,5	0,4
Luxembourg	1,0	2,4
Total et moyenne	12 152,3	32,8

Production des principales sociétés de l'UE		
société	Pays	surface en milliers de m ²
GREENoneTEC	Autriche	217
Ikarus-Solar	Allemagne	150
Viessmann	Allemagne	100
Solvis	Allemagne	n.c.
Giordano	France	46
Arcon Solvarme	Danemark	50
Clipsol	France	6,2
Sun Master	Autriche	20
ESE	Belgique	70
Sunstrip AB	Suède	70
Falck Ltd	Grèce	n.c.

2. Les capteurs solaires photovoltaïques

Puissance installée en 2002 dans les pays de l'UE en MWc ¹			
pays	relié au réseau	hors réseau	total
Allemagne	258,00	20,00	278,00
Pays-Bas	23,68	4,63	28,31
Italie	10,35	12,40	22,75
Espagne	7,91	11,39	19,30
France	1,47	15,18	16,65
Autriche	7,88	2,16	10,04
Suède	0,18	3,10	3,28
Finlande	0,14	2,89	3,03
Grande-Bretagne	3,63	0,62	4,25
Danemark	1,44	0,23	1,67
Grèce	1,04	1,33	2,37
Portugal	0,27	1 19	1,46
Belgique	0,53	0,00	0,53
Total	316,52	75,12	391,64

Répartition des types de fabrication	
technologie	%
Si polycristallin	56,4
Si monocristallin	28,1
Si amorphe	10,9
Si ruban	3,2
autres	1,4

On constate au fil des ans une baisse sensible de la production de cellules au silicium monocristallin. Cela est dû au coût plus élevé de cette technologie face à celle du silicium polycristallin. Ce dernier est, en effet, obtenu par refonte des chutes des barres de silicium pur utilisé dans l'industrie de fabrication des puces électroniques.

¹ MWc (mégawatts-crête) valeur obtenue pour un éclairement de 1000 W/m² (avec un spectre correspondant à une valeur de AM=1,5), une température de 25°C, le système fonctionnant avec une impédance optimale.

**Puissance produite et part de marché
des principaux fabricants
en 2002**

société	MWc	%
Sharp	123,0	23,0
BP Solar	66,8	12,5
Kyocera	60,0	11,2
Shell Solar	49,5	9,2
Sanyo	35,0	6,5
Astropower	29,7	5,5
RWE Solar	29,5	5,5
Isofoton	27,4	5,1
Mitsubishi	24,0	4,5
Photowatt	17,0	3,2
autres	73,3	13,7
Total	535,2	100,0

**Production par pays
en 2002**

pays	MWc
Japon	251,1
USA	100,6
Allemagne	57,0
Espagne	44,1
Inde	19,6
France	17,5
Monde	535,2



*Batterie de cellules photovoltaïques alimentant une
pompe à eau (au Gabon).*

ANNEXE I

ORGANISMES, SOCIÉTÉS ET ASSOCIATIONS S'INTÉRESSANT À L'ÉNERGIE SOLAIRE¹

nom	adresse	contacts
ADEME Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie	27 rue Louis Vicat 75015 Paris	01.47.65.20.00 www.ademe.fr
AIE Agence Internationale de l'Énergie	9 rue de la Fédération 75739 Paris cedex 15	www.iea.org
AJENA	28 bd. Gambetta 39004 Lons-le-Saunier	03.84.47.81.10
Apex BP Solar	1 rue du Grand Chêne 34270 St. Mathieu-de- Tréviers	04.99.62.26.22 apex-bpsolar.com
Avenir Énergies	ZAC Grand Angles 30133 Les Angles	04.90.15.01.28 www.ifrance.com
BP Solarex	4 rue de l'Industrie 34880 Laverune	04.67.07.02.02
Buderus Chauffage	ZI du Metzgerhof 67501 Haguenau	03.88.90.57.00
CEDER Centre d'Étude Drômois sur les Énergies Renouvelables	4 impasse Magali 26110 Nyons	04.75.26.22.53 perso.wanadoo.fr
CIELE Centre d'Information sur l'Énergie et L'Environnement	96 canal Saint Martin 35700 Rennes	02.99.54.42.98 www.ciele.org
CIEN Centre International des Énergies Nouvelles	ZA Bastillac Nord 65000 Tarbes	05.62.93.93.13 www.cien.org
CLER Comité de Liaison des Énergies Renouvelables	2B rue Jules Ferry 93011 Montreuil	01.55.86.80.00 www.cler.org
Clipsol	Les Combaruches 73100 Aix-les-Bains	04.79.34.35.36 www.clipsol.com
Cythélia Consultants	BP 319 73375 Le Bourget du Lac	04.79.25.31.75 www.cythelia.fr
De Dietrich Thermique	57 rue de la Gare 67580 Mertzwiller	03.88.80.27.00 www.dedietrich.com

¹ Remarque : cette liste ne saurait être exhaustive.

EcoMaison	24 rue des Études 11300 Limoux	04.68.31.92.50
EFE Edition, Formation, Entreprise	50 av. de la Grande Armée 75848 Paris cedex 17	01.44.09.24.23 www.efe.fr
Enerplan	Chemin de la Ferrage 83330 Le Castellet	04.94.32.70.08 www.enerplan.asso.fr
ESE France European Solar Engineering	Le Brusquet 26560 Eygalayes	04.75.28.42.09 ese-solar.com
FAES France Fortum Advanced Energy System	Noisiel 77437 Marne-la-Vallée	01.60.37.35.60
FONDEM Fondation Énergies pour le Monde	146 rue de l'Université 75007 Paris	01.44.18.00.80 www.fondem.org
GERES Groupe Énergies Renouvelables et Environnement	2 cours Maréchal Foch 13400 Aubagne	04.42.18.55.88 geres.free.fr
HESPUL Association	114 bd. du 1 novembre 1918 6910 Villeurbanne	04.37.47.80.90 www.hespul.org
Iméris	33 av. du Maine 75755 Paris	01.45.38.37.76
Jacques Giordano Industries	ZI des Paluds 13685 Aubagne	04.42.82.31.53 www.giordano-industries.com
NPP New-Point-Products	1967 rte de Beausoleil 06320 La Turbie	04.93.78.70.54
Photowatt International	ZI Champfleuri 38300 Bourgoin-Jallieu	04.74.93.80.20 www.photowatt.com
ROOS Diffusion	4 rue Saint Angeau 57910 Neufgrange	03.87.98.80.51 www.roos-solar.com
Sbthermique Solaire et Biomasse thermique	au Combiau 38460 Dizimieu	04.74.90.43.08 www.sbthermique.com
SER Syndicat des Énergies Renouvelables	37 rue La Fayette 75009 Paris	01.48.78.05.60 www.ser-fra.com
SES Solar Energy System	ZI des Consacs 83170 Brignoles	04.98.05.13.13 www.solensys.com
Solahart	Av. de Larrieu 31094 Toulouse	05.62.11.55.00 www.solahart.com
Solaire Connexion	Chanareille 07270 Empurany	04.75.06.34.96

Solarinox	22 rue de l'Ancienne Mairie 67220 St Pierre Bois	03.88.85.65.21
Solems	ZA les Glaises 92124 Palaiseau	01.69.19.43.40 www.solems.com
Sorelec	144 av. du 8 mai 1945 83600 Fréjus	04.94.52.96.93 www.sorelec.fr
Sunwatt France	18 rue René Cassin 74240 Gaillard	04.50.31.35.85
Systèmes Solaires	146 rue de l'Université 75007 Paris	01.44.18.00.80 www.systemes-solaires.com
Technosolar Association	Colonne 39800 Poligny	03.84.37.57.00
Tecsol	105 av. Alfred Kastler 66004 Perpignan	04.68.68.16.40 www.tecsol.fr
Total Energie	12 allée du Levant 69890 La Tour de Salvagny	04.78.48.88.50 www.total-energie.fr
Viessmann	BP 59 57380 Faulquemont	03.87.29.17.00 www.viessmann.fr
Zenit	45 av. Amiral Courbet 59130 Lambersart	03.20.93.79.94 www.zenit.fr



ANNEXE J

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFD	Agence Française du Développement
AIE	Agence Internationale de l'Énergie (cf. IEA)
CIDFER	Centre d'Information, de Documentation et de Formation sur les Énergies Renouvelables
CIRENE	Centre d'Initiative et de Recherche dans le domaine l'ENergie et de l'Environnement
COSTIC	Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques
CRE	Commission de Régulation de l'Electricité
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DGEMP	Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières
ECS	Eau Chaude Sanitaire
ENR	ENergies Renouvelables
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
ERD	Electrification Rurale Décentralisée
FER	Fonds d'Électrification Rurale
GRS	Garantie de Résultats Solaires
Hip-Hip	High Integrated Photovoltaic-High tech In Public
HQE	Haute Qualité Environnementale
IEA	International Energy Agency (cf. AIE)
ISES	International Solar Energy Society
PRS	Projet Régional Solaire
PSD	Plancher Solaire Direct
PV	PhotoVoltaïque
PVD	Pays en Voie de Développement
RECS	Renewable Energy Certificate System
SER	Syndicat des Energies Renouvelables
Sy.Fa.Sol	Syndicat des Fabricants de capteurs Solaires
UCF	Union Climatique de France
UE	Union Européenne

ANNEXE K

PETIT DICTIONNAIRE ANGLAIS-FRANÇAIS

A

absorbing surface	surface absorbante
absorptance	coefficient d'absorption (α)
absorption	absorption
air conditioning	air conditionné
air mass	masse atmosphérique (AM)
angular absorptance	coef. d'absorption directionnelle (α_θ)
antifreeze	antigel
aperture	ouverture
auxiliary energy	énergie d'appoint
azimuth	azimut (a)

B

back losses	pertes (thermiques) face arrière
band gap	bande interdite
beam radiation	rayonnement direct (S^*)
blackbody radiator	corps noir (CN)
blackbody emissive power	émittance du CN (E_b)

C

carrier	porteur (charge électrique)
clear day	jour de ciel clair (sans nuage)
cloudy day	jour de ciel couvert
coating	revêtement
collection efficiency	facteur de collecte
collector	capteur
concentration ratio	rapport de concentration (RC)
concentrator	concentrateur
cooling	réfrigération
crop drying	séchage de produits agricoles

D

day length	durée du jour (ddj)
declination	déclinaison
diffuse radiation	rayonnement diffus (D)

E

efficiency	rendement (η)
efficiency factor	rendement d'irrigation (F)
emissive power	émittance (E)
emittance	facteur d'émission (ε)
extinction coefficient	coefficient d'extinction (\tilde{K})
extraterrestrial	hors atmosphère

F

flat-plate solar collector
focal length
focusing collector

capteur solaire plan
distance focale
capteur à concentration

G

glass
gray surface
ground reflectance

verre
surface grise
albédo du sol (a^*)

H

haze
heat exchanger
heat removal factor
hole-electron pair
hour angle

brume
échangeur de chaleur
facteur de transfert thermique (F_t)
paire électron-trou
angle horaire (ω)

I

index of refraction
infrared emittance
insolation
insulation
irradiation, irradiance

indice de réfraction (n)
coefficient d'émission infrarouge (ε)
éclairage (G^* , S^* , D^*)
isolant
irradiation (G , S , D)

L

leakage
load
local standard time
long-wave

fuite
charge (thermique...)
temps légal (TL)
grande longueur d'onde

M

monochromatic radiation
mortgage

rayonnement monochromatique
emprunt

O

optical efficiency
orienting system

rendement optique (ν)
système d'orientation

P

packed bed
pebble bed
photocell
photovoltaic effect
power requirements
pure sky

lit d'éléments empilés
lit de pierres
cellule photovoltaïque
effet photovoltaïque
besoins en énergie
ciel pur (pas de particules en suspension)

R

radiation
receiver
reflectance
refractive index

rayonnement
récepteur
facteur de réflexion (ρ)
indice de réfraction (n)

rim angle
rock pile

ouverture
lit de pierres

S

scattering
service hot water
silicon
slope
solar altitude
solar cell
solar constant
solar spectrum
solar time
solar water heater
space heating
spectral irradiance
specular reflectance
storage
sundial
sun-path diagram
sunrise
sunset
sunshine
swimming pool

diffusion
eau chaude sanitaire (ECS)
silicium
inclinaison (i)
hauteur du soleil (h)
cellule PV
constante solaire (C^*)
spectre solaire
temps solaire vrai (TSV)
chauffe-eau solaire
chauffage des locaux
irradiation monochromatique (E_λ)
coef. de réflexion spéculaire (ρ_θ)
stockage
cadran solaire
diagramme solaire
lever du soleil (LS)
coucher du soleil (CS)
ensoleillement
piscine

T

thermal load
tilt
tilt factor
top losses
total solar radiation
tracking system
transient behavior
transmission factor
transparent cover

besoin thermique
inclinaison (i)
rapport d'éclairement (R_G , R_S , R_D)
pertes (thermiques) face avant
éclairement global (G)
système d'orientation
phénomène transitoire
coefficient de transmission (τ)
couverture transparente

V

view factor

facteur de forme

W

water supply
wavelength

alimentation en eau
longueur d'onde

Z

zenith angle

hauteur du soleil à 12 h TSV (h_m)

SOURCES

BIBLIOGRAPHIE

Ré, le mythe et le culte du soleil dans l'Égypte ancienne
Bob de Gryse - *Perron*

Cadrans solaires
Jean-Noël Tardy - *Édisud*

Les cadrans solaires
Jean-Marie Homet - *Éditions Ch. Massin*

Principles of solar engineering
Frank Kreith/Jan F Kreider - *McGraw-Hill*

Solar energy thermal processes
Duffie/Beckman - *Wiley-Interscience*

Le rayonnement solaire
Bernard/Menguy/Schwartz - *Technique et documentation*

Ingénierie des systèmes solaires
Sfeir/Guarracino - *Technique et documentation*

Les photopiles solaires
Laugier/Roger - *Technique et documentation*

L'énergie solaire
Peyturaux - *P.U.F*

Le soleil et la terre
André Boischot - *P.U.F*

Le soleil
Raymond Michard - *P.U.F*

Les énergies du soleil
Audibert/Rouard - *Le Seuil*

Atlas énergétique du rayonnement solaire pour la France
Tricaud - *Pyc Édition*

Le chauffe-eau solaire
Cabirol/Pelissou/Roux - *Édisud*

Les capteurs héliothermiques
Desautel - *Édisud/Pyc Édition*

Énergie solaire et stockage d'énergie
Dumon – Masson

Calcul d'installations solaires à eau
Chateauminois/Mandineau/Roux - Édisud/Pyc Édition

L'énergie solaire
Madanjeet Singh - Unesco

Systèmes solaires
Revue – 146, rue de l'Université 75007 Paris

SUR LE WEB

On peut rechercher des informations sur les sites [www](#) donnés dans la colonne *contacts* du tableau de l'*Annexe I*.

On trouvera d'autres renseignements sur les sites suivants¹

www.camif-habitat.fr

www.eauchaudeservice.fr

www.energie-ren.com

www.energies-nouvelles.com

www.energies-renouvelables.org

www.enerplan.com

www.erec-renewables.org

www.imp.cnrs.fr/energie

www.industrie.gouv.fr/energie

www.mastervoltsolar.com

www.mysolar.com

www.outilssolaires.com

www.shell-renewables.com

www.siemenssolar.com

www.sourceoecd.org

¹ liste non exhaustive.

GLOSSAIRE

Absorptivité	Cf. facteur d'absorption
Albédo	Cf. facteur de réflexion
Analemme	Courbe en forme de huit qui, sur les cadrans solaires, permet de tenir compte de l'équation du temps.
Azimut	(a) Angle que fait, en un lieu donné, la direction nord-sud avec la projection dans le plan horizontal de la direction Terre-Soleil.
Bande interdite	Niveau minimum d'énergie que doit posséder un photon pour déplacer un électron de la bande de valence à la bande de conduction.
Bande spectrale	Portion d'un spectre d'émission correspondant à une plage continue de longueurs d'onde. Dans le spectre solaire, on distingue par exemple la bande visible qui va de 0,38 μm à 0,72 μm .
Cadran solaire	Surface marquée de lignes et permettant la détermination de l'heure grâce à une indication donnée par le rayonnement solaire incident (ombre ou tache lumineuse).
Capteur plan	Capteur solaire absorbant une partie du rayonnement direct et diffus. Il est formé principalement de 5 éléments <ol style="list-style-type: none">1. Une surface absorbante2. Un fluide caloporteur3. Une couverture transparente (facultative)4. Un isolant (facultatif)5. Un coffre de protection (facultatif)
Capteur solaire	Tout système recevant l'énergie solaire et la convertissant en une énergie utile.
Cellule photovoltaïque	Système transformant le rayonnement solaire en énergie électrique.
Chaleur spécifique	(c_p) Caractéristique thermique d'un matériau correspondant à l'énergie nécessaire pour élever de 1 degré l'unité de masse de celui-ci.
Concentrateur	Système concentrant le rayonnement solaire afin d'atteindre des flux énergétiques et des températures élevés
Concentration géométrique	(C) Rapport de l'ouverture d'un concentrateur sur l'image du Soleil dans le plan focal.
Condenseur	Échangeur de chaleur dans lequel un fluide passe de l'état gazeux à l'état liquide.
Constante solaire	(C^*) Puissance du rayonnement solaire reçu par une surface normale au rayonnement incident et placée à la limite de

	l'atmosphère terrestre.
Conversion directe	Transformation directe du rayonnement solaire en électricité sans passage par un cycle thermodynamique.
COP	<i>Coefficient Of Performance</i> rapport de l'énergie utile échangée (froid pour les réfrigérateurs ou chaud pour les pompes à chaleur) sur l'énergie consommée.
Corps noir	(CN) Surface idéale qui absorbe tout rayonnement incident et qui émet le maximum de rayonnement à une température donnée.
Couverture transparente	Surface faite d'un matériau transparent au rayonnement solaire mais opaque au rayonnement infrarouge, permettant de réaliser un effet de serre.
Diagramme solaire	Diagramme circulaire construit pour une latitude donnée et permettant de connaître les coordonnées locales du Soleil.
Distillation solaire	Procédé permettant d'obtenir de l'eau douce à partir d'eau saumâtre sous l'effet du rayonnement solaire. Chauffée par ce dernier, l'eau s'évapore puis est recueillie par condensation.
Échangeur de chaleur	Système permettant de transférer de l'énergie thermique d'un fluide à un autre.
Éclairement solaire	Énergie radiative reçue par unité de surface plane et par unité de temps (W/m^2).
Effet photovoltaïque	Création d'une force électromotrice sous l'effet d'un rayonnement tombant sur la jonction créée par deux matériaux différents en contact.
Émissivité	Cf. Facteur d'émission
Énergie solaire	Énergie émise par le Soleil sous forme de rayonnement. Cette énergie est due à la fusion nucléaire d'hydrogène en hélium.
Équation du temps	(ET) équation donnant la différence entre la durée du jour vrai et la durée du jour moyen qui est de 24 h. Cette différence est due à l'orbite elliptique de la terre autour du Soleil.
Évaporateur	Échangeur de chaleur dans lequel un fluide passe de l'état liquide à l'état gazeux.
Facteur d'absorption	(α) Fraction du rayonnement absorbée par une surface sur l'énergie totale reçue sous forme de rayonnement.
Facteur de réflexion	(ρ) Fraction du rayonnement réfléchi par une surface sur l'énergie totale reçue sous forme de rayonnement.
Facteur de transmission	(τ) Fraction du rayonnement ayant traversé un milieu donné sur l'énergie totale entrant dans le milieu.
Facteur d'émission	(ϵ) Rapport de l'énergie rayonnée par une surface sur l'énergie qu'elle émettrait si c'était un corps noir à la même température.

Four solaire	Système utilisant la concentration du rayonnement solaire afin d'obtenir de hautes températures.
Haute qualité environnementale	(HQE) méthode de construction d'un bâtiment pour laquelle sont étudiés avec soin les aspects environnementaux durant le chantier (matériau, énergie, bruit.), l'utilisation (consommation énergétique, entretien,...) et la déconstruction (recyclage, pollution,...).
Hauteur	(h) Angle que fait, en un lieu donné, le plan horizontal avec la droite tracée entre ce lieu et le Soleil.
Héliostat	Système permettant de renvoyer le rayonnement solaire vers une cible.
Héliothermoélectricité	Procédé utilisant un cycle thermodynamique pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire.
Inclinaison	(i) Angle que fait le plan d'ouverture du capteur avec le plan horizontal.
Indice de rentabilité	(IR) rapport des sommes économisées durant la vie d'une installation solaire sur le coût global de celle-ci. Difficile de chiffrer <i>a priori</i> il permet de savoir approximativement si une installation solaire est rentable; dans ce cas $IR > 1$
Isohoraire	Courbe définie par les différentes positions du soleil pour une heure donnée de la journée, tout au long de l'année.
Latitude	(ϕ) Une des deux coordonnées terrestres d'un point de notre planète (cf. Longitude). C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Sa valeur est positive dans l'hémisphère nord, négative dans l'hémisphère sud.
Longitude	(L) une des deux coordonnées terrestres d'un point de notre planète (cf. Latitude). C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien origine passant par la ville de Greenwich. Sa valeur est positive à l'ouest et négative à l'est du méridien origine.
Masse atmosphérique	(AM <i>Air Mass</i>) rapport de la distance parcourue par le rayonnement solaire dans l'atmosphère ramenée à celle qu'il parcourrait s'il était au zénith.
Méridien	Demi grand cercle passant par l'axe des pôles terrestres et le point considéré sur notre planète (méridien terrestre) ou bien passant par l'axe des pôles célestes et l'astre considéré (méridien céleste).
Neutrino	Particule neutre de masse extrêmement faible qui la rend difficilement détectable.
Nombre de degrés-jours	(ndj) Grandeur servant à la détermination des besoins en chauffage d'une habitation.
Ouverture	Section de passage du rayonnement avant absorption dans un concentrateur dirigé vers le Soleil.

Parabole	Courbe décrite par un point se déplaçant dans un plan de telle façon que ses distances à un point fixe (foyer) et à une droite donnée (directrice) soient égales.
Parallaxe d'un astre	Angle sous lequel on voit de l'astre une longueur donnée rayon équatorial terrestre pour les astres du système solaire ou bien distance Terre-Soleil pour les autres.
Photon	<i>Grain de lumière</i> dans la théorie corpusculaire du rayonnement. L'énergie w de cette particule élémentaire est reliée à la longueur d'onde λ du rayonnement par l'égalité suivante $w=h.c/\lambda$ où h est la constante de planck et c la vitesse de la lumière.
Photosynthèse	Processus utilisant le rayonnement solaire pour élaborer des matières organiques à partir d'eau, de gaz carbonique et d'éléments minéraux tout en rejetant de l'oxygène.
Pyranomètre	Instrument servant à la détermination du rayonnement global (direct+diffus).
Pyrhéliomètre	Instrument servant à la mesure du rayonnement solaire direct.
Radiomètre	Instrument servant à la mesure de l'intensité d'un rayonnement quelconque.
Rayonnement infrarouge	Rayonnement thermique de longueur d'onde supérieure à $0,72 \mu\text{m}$.
Rayonnement solaire diffus	Fraction du rayonnement solaire en provenance de toutes les directions, y compris du sol après une éventuelle réflexion.
Rayonnement solaire direct	Fraction du rayonnement solaire en provenance de la direction Terre-Soleil.
Réflectivité	Cf. Facteur de réflexion
Rendement d'un capteur	(η) Rapport de l'énergie utile récupérée sur l'énergie solaire totale tombant sur le capteur
Spectre	Ensemble des rayonnements émis par un corps. On peut le diviser en différentes bandes spectrales.
Surface absorbante	Élément de base d'un capteur solaire. Son rôle est de transformer le maximum de rayonnement solaire incident en énergie utile et de transmettre celle-ci à un fluide caloporteur
Sélectivité	Caractéristique d'une surface mesurée par le rapport entre son absorptivité solaire α^* et son émissivité infrarouge ε .
Semi-conducteur	Matériau dont la structure atomique le situe, au regard de la conductivité électrique, entre un isolant et un métal. Cette conductivité peut être grandement modifiée par ajout d'une très petite quantité de matériau dopant. En fonction de celui-ci, le semi-conducteur dopé peut être de type N (excès d'électrons) ou de type P (déficit d'électrons).

Temps solaire vrai	(TSV) Système de mesure de l'heure en un point donné, pour lequel il est midi quand le soleil se trouve dans le plan du méridien local.
Tension en circuit ouvert	(V_{co}) Tension maximale que l'on peut mesurer aux bornes d'une photopile.
Thermocouple	Instrument constitué de deux fils de matériaux différents dont les extrémités sont reliées entre elles. Il se crée une faible tension quand les deux jonctions sont à des températures différentes. Si l'une des jonctions est maintenue à une température de référence, la mesure de cette tension permet d'en déduire la température de l'autre jonction.
Thermopile	Appareil constitué d'un grand nombre de thermocouples reliés en série.
Thermosiphon	Phénomène convectif se produisant dans un circuit fermé lorsque la portion localement chauffée d'un fluide s'élève poussée par la portion refroidie, plus froide et plus dense.
Transmissivité	Cf. Facteur de transmission
Trou	Défaut d'électron dans la bande de valence et se comportant comme un électron de charge positive.
Wafer	Plaquette de silicium servant à la fabrication de cellules photovoltaïques.
Watt-crête	Unité servant à définir les performances d'un système photovoltaïque. Un watt-crête correspond à une puissance de 1 watt fournie à 25°C sous un éclairement de 1000 w/m ² correspondant à un spectre solaire am 1,5.



Batteries de capteurs solaires sur des toits en Crète.

INDEX

A

absorbeur	
métallique	97
plastique	98
absorption	
atmosphère	40
solaire	95
Adams	16
albédo	45
ammoniac	163
analemme	64
analogie électrique	109
analyse économique	167
angle	
ouverture	171
horaire	56
solide	174,177
année	
lumière	16
tropique	55
aphélie	22
ascension droite	57
astigmatique (surface)	180
atmosphère	
basse	36
masse	38
structure	35
standard	33-34
atome dopé	195
auroras polaires	21
azimut	55

B

ballon de stockage	132
bande	
conduction	194
interdite	194
spectrale	29
valence	194
bilan	
énergétique annuel	46
radiatif de la Terre	50
bouilleur	162
bromure de lithium-eau	162

C

cadran solaire	64
capacité calorifique effective	121
capteurs à tubes sous vide	163
caustique d'aberration sphérique	180
ceintures de Van Allen	36
centrales solaires	189-192
cercle polaire	68
chromosphère	21

ciel

clair	82
variable	83
circulateur	126
climatisation solaire	161
coefficient	
atténuation	42
besoins thermiques	145
déperdition thermique	143
déperdition volumique	144,145
extinction	102
transmission	42
compacité (d'un bâtiment)	149
concentrateur	
cylindro-parabolique	186-188
idéal	178
parabolique	182-185
sphérique	180-181
concentration	
effective	173,190
énergétique	173,180,184,187
géométrique	173,175-
idéale	178,180,183,187
conditions de trouble	173,178,182,186
conductance thermique	88
constante solaire	109
coordonnées	24
équatoriales	57
horaires	56
horizontales	55
locales	55
semi-locales	56
COP	56
Copernic	161
courant	15
idéal	198
obscurité	200
couronne solaire	21
coût global annuel	168
couverture transparente	99
cycle	
Bethe	23
carbone	23
eau	50
frigorifique à absorption	161
proton-proton	23

D

déclinaison	54, 62
degrés-jours	146
diagramme LiBr-H ₂ O	164
diagramme solaire	66
diffusion (atmosphère)	41

dioptre	101
distillation solaire	166
droite de rendement	110
durée d'insolation	83

E

eau (atmosphérique)	37
eau chaude sanitaire	125
éclairage	
diffus	78
direct	77
global	79
solaire	41,77
effet	
de masque	75
de serre	99
photovoltaïque	193
efficacité	
concentrateur	173
lumineuse	43
émission infra-rouge	95
émittance énergétique	27, 95
épaisseur équivalente	38
équateur	
céleste	57
terrestre	72
équation du temps	60, 62
espace tampon	150
exosphère	36

F

facteur	
absorption	95
apports gratuits	145
collecte	198
courbe	199,202
éclairage	83, 94
émission	95
four	173
irradiation	83, 94
réflexion	95
tension	199
transfert thermique	117
transmission	95,101
fenêtre de transparence	48
fluide caloporteur	98
flux d'albédo	31
formule de Fresnel	102
formules de Gauss	59
fuseau	61
fusion nucléaire	23

G

Galaxie (la)	16
Galilée	15
géocentrisme	15
Giordano Bruno	15
gnomon	64

H

Haute Qualité Environnementale	149
hauteur angulaire	55
héliographe	87
hélium	21
Herschel	16
Hipparque	15

I

image de Gauss	172
implantation (d'un bâtiment)	150
intérêts d'emprunts	167
ionosphère	36
irradiation solaire	81
isolant	104, 106
isolation	150

J

jour solaire vrai	60
-------------------	----

K

Képler	16
--------	----

L

latitude	53
Le Verrier	16
lit de pierres	137
loi	
Descartes	101
Képler	60
Rayleigh	41
longitude	53
longueur d'onde de coupure	96,196
lumière solaire	43

M

magnétopause	36
magnétosphère	36
magnitude	19
maison bioclimatique	149
masse atmosphérique	39
méridien local	53,55
mésopause	36
mésosphère	36
midi solaire	62
montage	
parallèle	207
série	207
mur	
capteur	141
composé	143
semi-infini	109
Trombe	141

N

nadir	56
Newton	16
noyau solaire	19

numéro du jour 55

O

onduleur 208
optimisation économique 169
orages magnétiques 21
OSR 96
ouverture 172
oxygène 37
ozone 33,36

P

parsec 16
périhélie 22
photocourant 200
photométrie 43
photon 196
photopile
 concentration 205
 multicolore 206
photosphère 20,25
piscine solaire 153
plan de l'écliptique 22,54
planètes (table) 18
Platon 15
point vernal 54
pont thermique 144
précession des équinoxes 54
protubérance solaire 21
pyranomètre 86
pyrhéliomètre 86
Pythagore 15

R

raie 27
rapport d'éclairement 79
rayonnement lumineux 43
rayons paraxiaux 172
réflexion solaire 95
réfrigération par compression 161
régime transitoire 120
réglementation thermique 2000 147
rendement
 Carnot 171
 conversion 189
 instantané 110
 irrigation 116
 optique 110
 photopile 197
résistance
 charge 200,202
 contact 105
 parallèle 199
 série 199
 thermique 109

S

séchage solaire 159
sélectivité 95
silicium 193

amorphe 194
monocristallin 194
polycristallin 194
soleil (caractéristiques) 19
spectre
 continu 21
 solaire 27
spectrohéliographe 27
sphère céleste 55, 58
SSM 96
SST 206
stigmatique (surface) 182
stockage 123,132,137
stratopause 36
stratosphère 33
style 64
surface absorbante 95

T

table 64
taches solaires 20
taux de couverture solaire 127
température
 air 131
 chaudière 190
 ciel 107
 eau 131
 maximale d'un capteur 178
 sans chauffage 145
 sol terrestre 49
 Terre 49
temps 61
 légal
 solaire moyen 60
 solaire vrai 60
 universel 61
thermopile 86
thermosiphon 125
thermosphère 36
Tombaugh 16
transmission (du verre) 103
tropical 71
troposphère 33, 37

U

unité astronomique 16
Ushuaia 74

V

vent 150
vent solaire 21
ventilation 151
vitrage 143
VMC 151
Voie Lactée 16

W

world solar challenge 210

Z

zénith 56

classes préparatoires scientifiques :

- Sciences industrielles. Automatismes et automatique 256 p.
- Sciences industrielles. Mécanique 1re année 256 p.

J.-Y. FABERT
F. BRONSARD, Cl. CHÈZE

calcul scientifique

- Faire des maths avec mathematica. Initiation, thèmes d'étude 160 p. (B)
- Analyse harmonique. Cours et exercices 192 p. (B)
- Analyse et contrôle numériques du signal 192 p. (C)
- Tenseurs, variations et milieux continus. Formulations locale et variationnelle de la mécanique des milieux continus élastiques 288 p. (C)
- Codes correcteurs. Principes et exemples 192 p. (C)
- Analyse spectrale Cours Supélec 192 p. (C)

N. VERDIER
B. ROSSETTO
Ph. DESTUYNDER, F. SANTI
J.-F. GANGHOFFER
J. BADRIKIAN
G. FLEURY

physique fondamentale

- Mesure physique et instrumentation 192 p. (A)
- Mécanique générale. Cours, exercices et problèmes corrigés 288 p. (B)
- Exercices corrigés d'optique. Optique instrumentale. Optique de Fourier 192 p. (B)
- La mécanique quantique et ses applications 224 p. (C)
- Éléments de propagation électromagnétique 160 p. (B)

D. BARCHIESI
Cl. CHÈZE, H. LANGE
J. SURREL
A. et M.-F. CHARLIER
Ph. ROSNET

signaux et systèmes

- Signaux et systèmes continus et échantillonnés 192 p. (B)
- Signaux et systèmes linéaires Cours Supélec 192 p. (B)
- Modélisation et analyse des systèmes linéaires 224 p. (C)
- Techniques micro-ondes. Dispositifs passifs et tubes micro-ondes Cours Supélec 320 p. (C)
- Optoélectronique. Composants photoniques et fibres optiques Cours Supélec 320 p. (C)
- Le radar. Théorie et pratique Cours Supélec 160 p. (C)

M. VILLAIN
A. PACAUD
J.-F. MASSIEU, Ph. DORLÉANS
M. HÉLIER
Z. TOFFANO
J.-M. COLIN

automatique

- Systèmes asservis linéaires 224 p. (B)
- Asservissements linéaires continus 288 p. (B)
- Systèmes et asservissements continus 320 p. (C)
- Problèmes résolus d'automatique 288 p. (B)
- Régulation PID en génie électrique. Étude de cas 256 p. (C)
- Commande automatique des systèmes linéaires, utilisation de MATLAB 256 p. (C)
- Commande numérique des systèmes Cours Supélec 256 p. (C)
- Ingénierie de la commande des systèmes 256 p. (C)

M. VILLAIN
P. ROUSSEAU
É. OSTERTAG
Ch. BURGAT
D. JACOB
V. MINZU, B. LANG
E. GODOY, É. OSTERTAG
A. CROSNIER, G. ABBA, B. JOUVENCEL, R. ZAPATA

électronique

- Des clés pour l'électronique. Travaux dirigés illustrés par simulation 160 p. (A)
- Traitement du signal analogique. Cours 224 p. (A)
- L'outil graphique en électronique et automatique 224 p. (B)
- Modulation d'amplitude, Cours et exercices 352 p. (C)
- Electronique radiofréquence 256 p. (C)

B. GIRAUT
T. NEFFATI
J. BAILLOU, G. CHAUVAT, C. PEJOT
F. BIQUARD
A. PACAUD

génie électrique

- Circuits électriques, Régimes continu, sinusoïdal et impulsionnel 192 p. (A)
- Annales d'électrotechnique BTS Maintenance 256 p. (A)
- T.P. d'électrotechnique par simulation. Préparation, manipulation et solution avec PSIMDEMO 224 p. (A)
- Le moteur asynchrone. Régimes statique et dynamique 160 p. (C)
- Modélisation et commande des moteurs triphasés 256 p. (C)
- Électrotechnique. Machines et réseaux Cours Supélec 256 p. (C)
- Machines électriques. Théorie et Mise en oeuvre Cours Supélec 256 p. (C)
- Les semiconducteurs de puissance Cours Supélec 320 p. (C)

J.-P. BANCAREL
D. VINCENT, N. ORTEGA
F. LEPLUS
L. MUTREL
G. STURTZER, E. SMIGIEL
J.-P. FANTON
Ph. BARRET
P. ALOÏSI

informatique industrielle

- Circuits logiques programmables. Mémoires, PLD, CPLD, FPGA 256 p. (B)
- Logique combinatoire et séquentielle. Système, méthodes, réalisations 320 p. (C)
- Traitement numérique du signal. Théorie et applications 256 p. (C)
- Bu binaire au processeur. Méthodes de conception de circuits numériques et exercices 320 p. (BC)

A. NKETSA
Cl. BRIE
K. KPALMA, V. HAESE-COAT
E. MESNARD

génie mécanique

- Actions mécaniques, Statique, Inertie. De la théorie aux applications 224 p. (A)
- Dimensionnement des structures. Résistance des matériaux 224 p. (B)
- Mécanique des milieux déformables 288 p. (B)
- Vibrations des structures 224 p. (B)
- Transmissions mécaniques de puissance. Boîtes de vitesses automatiques 288 p. (C)

Cl. CHÈZE, F. BRONSARD
Cl. CHÈZE
M. FOURAR, Cl. CHÈZE
G. VENIZELOS
Ph. ARQUÈS

génie civil et matériaux

- Propriétés et comportements des matériaux 320 p. (B) A. CORNET, F. HLAWKA
- Béton armé. Application de l'eurocode 2 224 p. (B) R. NICOT
- Endommagement interfacial des métaux 256 p. (C) G. SAINDRENAN, R. LE GALL, F. CHRISTIEN

géotechnique

- Sécurité des ouvrages. Risques. Modélisation de l'incertain, fiabilité, analyse des risques 320 p. (C) J.-L. FAVRE

biophysique et génie de l'environnement

- Biophysique de l'environnement sonore 192 p. (B) C. GELIS
- Les traitements de l'eau. Cours et problèmes résolus 256 p. (B) Cl. CARDOT
- Techniques appliquées au traitement de l'eau 256 p. (B) (coord.) Cl. CARDOT

chimie et génie chimique

- Comprendre la chimie organique. Résumés de cours et exercices corrigés 224 p. (A) A. LASSALLE, D. ROBERT
- Assimiler la chimie organique. Aldéhydes, cétones, acides, amines et composés mixtes 192 p. (A) A. LASSALLE, D. ROBERT
- Chimie des solutions. Résumés de cours et exercices corrigés 224 p. (B) P.-L. FABRE
- Thermodynamique et cinétique chimique. Résumés de cours et exercices 224 p. (B) P.-L. FABRE
- Réactions thermiques en phase gazeuse. Modélisation 288 p. (C) G.-M. CÔME

biochimie

- Séparation et analyse des biomolécules. Méthodes physico-chimiques 256 p. (B) J.-P. SINE
- Cinétique et catalyse hétérogènes 320 p. (C) B. GILOT, R. GUIRAUD

génie énergétique

- Énergie solaire. Calculs et optimisation 320 p. (B) J. BERNARD
- Moteurs alternatifs à combustion interne. De la théorie à la compétition 288 p. (C) Ph. ARQUÈS
- Conception et construction des moteurs alternatifs 288 p. (C) Ph. ARQUÈS
- Transferts thermiques, application à l'habitat. Méthode nodale 224 p. (C) H. CORTES, J. BLOT
- Machines à fluides. Principes et fonctionnement 288 p. (C) M. PLUVIOSE
- Ingénierie des turbomachines. Cours et exercices résolus 288 p. (C) M. PLUVIOSE

génie industriel

- Analyse et maintenance des automatismes industriels. Cours, exos et sujets d'examen résolus 192 p. (B) A. REILLER
- Développement des Grafcets 192 p. (B) B. REEB
- Maintenance industrielle. De l'entretien de base à l'optimisation de la sûreté 288 p. (B) J.-M. AUBERVILLE

génie de production

- Management de projet technique 192 p. (B) C. CAZAUBON, G. GRAMACIA, G. MASSARD
- Méthodes, productique et qualité 224 p. (B) J.-M. CHATELET
- Organisation et génie de production 224 p. (B) F. LAMBERSEND
- Méthode d'aide à la décision. Approche théorique et études de cas 192 p. (B) R. LABBÉ

informatique :

- Gestion des processus industriels temps réel 224 p. (B) J.-J. MONTAIS
- Approche du temps réel industriel 160 p. (A) J.-M. DE GEETER
- Belle programmation et langage C Cours Supélec 192 p. (C) Y. NOYELLE
- Base de données. Implémentation avec Access 256 p. (B) J. AUBERT

génie logiciel

- Interfaces graphiques ergonomiques. Conception, modélisation 192 p. (B) J.-B. CRAMPES
- Méthode orientée objet intégrale MACAO 320 p. (B) J.-B. CRAMPES
- La conception orientée objet, évidence ou fatalité 160 p. (B) J.-L. CAVARERO, R. LECAT
- Conception des systèmes d'information. Méthodes et techniques 320 p. (B) P. ANDRÉ, A. VAILLY
- Spécification des logiciels. Deux exemples de pratiques récentes Z et UML 320 p. (C) P. ANDRÉ, A. VAILLY
- Exercices corrigés de conception logicielle. Modélisation par la pratique 320 p. (B) P. ANDRÉ, A. VAILLY
- Exercices corrigés d'UML. Passeport pour une maîtrise de la notation 320 p. (C) P. ANDRÉ, A. VAILLY
- Exercices corrigés en langage Z. Spécifications formelles par l'exemple 256 p. (C) P. ANDRÉ, A. VAILLY

télécommunications

- Transmission de l'information 192 p. (B) Ph. FRAISSE, D. MARTY-DESSUS, R. PROTIÈRE
- Architectures des réseaux et télécommunications 192 p. (B) P. LORENZ

sciences économiques

- Statistique sans mathématique 224 p. (A) J. BADIA, R. BASTIDA, J.R. HAÏT
- Gestion financière. Analyse et politique financières de l'entreprise 256 p. (B) A. RIVET
- Les marchés à terme agricoles 256 p. (B) N. HABERT

droit privé

- Connaître et comprendre le droit. Principes et cas pratiques 256 p. (B) C. GABET
- Questions de droit. 256 questions fondamentales et réponses commentées 256 p. (A) H. LESUEUR



Achevé d'imprimer sur les presses de l'Imprimerie BARNÉOUD

B.P. 44 - 53960 BONCHAMP-LÈS-LAVAL

Dépôt légal Août 2004 - N° d'imprimeur 15156

Imprimé en France

La collection TECHNOSUP dirigée par Claude Chèze est une sélection d'ouvrages dans toutes les disciplines, pour les filières technologiques des enseignements supérieurs.

Niveau **A Approche** (éléments, résumés ou travaux dirigés) *Initiation, mise à niveau*

Niveau **B Bases** (cours avec exercices et problèmes résolus) *IUP - IUT - BTS*

Niveau **C Compléments** (approfondissement, spécialisation) *Écoles d'ingénieurs, Maîtrise*

L'ouvrage (niveau B) :

Cet ouvrage répond aux besoins des ingénieurs, techniciens et étudiants confrontés à une utilisation rationnelle de l'énergie solaire.

Il présente les différentes notions en relation avec cette source d'énergie. Puis il développe les méthodes de calcul et fournit de très nombreuses données numériques.

Élément clé de l'énergie solaire basse température, le capteur plan est analysé de façon très détaillée, en privilégiant notamment l'étude du rendement et l'application au chauffage de l'eau et des locaux.

L'étude des surfaces catadioptriques est surtout orientée vers la concentration du rayonnement solaire en vue d'obtenir des hautes températures.

Enfin, l'ouvrage s'achève sur une approche des photopiles.

De très nombreuses applications chiffrées développent et précisent tous les aspects de la démarche.

L'auteur

Jacques Bernard, ingénieur ENSMA (Poitiers), docteur-ingénieur et agrégé de mécanique, est professeur à l'INSA de Toulouse où il enseigne l'énergétique au département de génie mécanique.

Illustration de couverture Dessin de Léonard de Vinci.



9 782729 818975

ISBN 2-7298-1897-9